

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO  
PARA UN EQUIPO EXPERIMENTAL DE ELECTROHILADO POR  
CENTRIFUGADO DE NANOFIBRAS POLIMÉRICAS

HELIO HERNANDO DÁVILA GÓMEZ  
JUAN CARLOS TOBACIA MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
DUITAMA  
2016

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO  
PARA UN EQUIPO EXPERIMENTAL DE ELECTROHILADO POR  
CENTRIFUGADO DE NANOFIBRAS POLIMÉRICAS

HELIO HERNANDO DÁVILA GÓMEZ  
JUAN CARLOS TOBACIA MARTÍNEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico  
Proyecto presentado en la modalidad monografía

Director  
Edgar Absalón Torres Barahona  
MSc. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA

DUITAMA

2016

NOTA DE ACEPTACION:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Duitama, 06 de octubre de 2016

*A nuestros padres por ser el motor que nos impulsa a alcanzar cada una de nuestras metas; por brindarnos su afecto y apoyo incondicional, y por formarnos con valores y carácter para poder aportar soluciones frente a las adversidades.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primero a Dios por darnos fortaleza en los momentos difíciles, por acompañarnos y guiarnos a lo largo de nuestra carrera, llevándonos a cumplir uno de nuestros más grandes sueños. A cada una de nuestras familias por su esmero colaboración y confianza en nuestras capacidades.

Al ingeniero Edgar Absalón Torres Barahona por su amistad, entusiasmo y total dedicación como director en el desarrollo del presente trabajo, al ingeniero Oliverio Durán por brindarnos su asesoría en aspectos importantes del proyecto, y en general a toda la planta de docentes de la escuela de ingeniería electromecánica por aportarnos sus conocimientos y experiencias a lo largo de toda nuestra carrera.

Al Grupo de Investigación en Energías y nuevas tecnologías GENTE por acogernos dentro de su grupo de trabajo y brindarnos espacios y herramientas para la ejecución de ésta investigación, así como a la DIN (Dirección de Investigaciones - Uptc) por el financiamiento de la misma. Y a nuestra Uptc por darnos la oportunidad de aumentar nuestros conocimientos y habilidades siendo el medio para formarnos profesionalmente.

A nuestros compañeros Edgar Darío Díaz y Rafael Antonio Ramírez por sus valiosos aportes, y a todos nuestros demás compañeros por su amistad, compañerismo y apoyo durante toda nuestra carrera.

GRACIAS A TODOS.

*Juan Carlos Tobacia Martínez*

*Helio Hernando Dávila Gómez*

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 ELECTROHILADO POR CENTRIFUGADO	17
2.2 OTROS TIPOS DE PROCESOS DE HILADO DE FIBRAS POLIMÉRICAS	18
2.3 APLICACIONES	20
2.4 PARÁMETROS DEL PROCESO DE ELECTROHILADO	22
2.5 CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS PREPARADAS POR ELECTROHILADO	24
2.6 SISTEMAS DE CONTROL	25
2.6.1 Control en lazo Cerrado	25
2.6.2 Control en lazo Abierto	26
2.6.3 Controladores Proporcionales	26
2.7 OTROS PRINCIPIOS Y TEORÍAS	27
3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y DETERMINACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL	29
4. DISEÑO DEL SISTEMA	37
4.1 DIAGRAMA DE PROCESO	38
4.2 DIAGRAMA DE FLUJO	39
4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN	41
4.3.1 Modelado CAD del equipo de inyección	41
4.3.2 Diseño del sistema de control de inyección.	44
4.3.2.1 Determinación de la estrategia de control	44
4.3.2.2 Modelamiento matemático del sistema de inyección	45
4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CENTRIFUGADO	49
4.4.1 Diseño del sistema de control de velocidad de centrifugado	51
4.4.2 Curva de comportamiento del sistema de centrifugado	52
4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO	53

4.5.1	Determinación de la estrategia de control	55
4.5.2	Curva de comportamiento del sistema de campo eléctrico	56
4.6	DISEÑO DEL CIRCUITO DE ENERGIZACIÓN DE COMPONENTES AC	58
5.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	59
5.1	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN	59
5.1.1	Construcción del equipo de inyección	59
5.1.2	Implementación del sistema de control del inyector	61
5.2	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CENTRIFUGADO	62
5.3	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO	64
5.4	TARJETAS ELECTRÓNICAS Y DE CONTROL	65
5.5	INTERFAZ DE USUARIO	68
5.6	ENSAMBLE DEL SISTEMA	71
5.6.1	Disposición de componentes	71
5.6.2	Integración con la interfaz de usuario	75
6.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS	77
6.1	PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO	77
6.1.1	Sistema de centrifugado	77
6.1.2	Aislamiento	80
6.1.3	Panel de control	82
6.1.4	Estructura del Equipo	83
6.1.5	Cableado	83
6.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	84
6.3	RESULTADOS	85
6.3.1	Manual de usuario	90
7.	CONCLUSIONES	91
8.	RECOMENDACIONES	93
	BIBLIOGRAFÍA	94
	ANEXOS	96

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características del banco de pruebas.	32
Tabla 2. Definición de estrategias de control.	36
Tabla 3. Cálculos para el sistema de inyección.	48
Tabla 4. Datos de calibración del sistema de centrifugado.	52
Tabla 5. Resultados proceso de calibración del sistema de campo eléctrico.	56
Tabla 6. Parámetros de calibración del Touch screen.	69



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema representativo del electrohilado por inyección de aguja.	16
Figura 2. Esquema del proceso de hilado por centrifugado.	17
Figura 3. Sistema representativo del electrospinning.	18
Figura 4. Método Multi-channel coaxial electrospinning.	19
Figura 5. Electrohilado de Doble flujo.	19
Figura 6. Aplicaciones de las fibras electrohiladas.	21
Figura 7. Esquema representativo de la fuerza centrífuga	27
Figura 8. Dirección del campo eléctrico	28
Figura 9. Modelado del banco de pruebas construido.	29
Figura 10. Despiece del banco de pruebas construido.	30
Figura 11. Máquina de algodón de azúcar empleada en banco de prueba.	31
Figura 12. Primer banco de pruebas.	32
Figura 13. Segundo banco de pruebas	33
Figura 14. Formación de fibras en el proceso de electrohilado	33
Figura 15. Fibras producidas en banco de pruebas	34
Figura 16. Análisis en SEM de fibras producidas	34
Figura 17. Sistemas que componen el equipo de electrohilado por centrifugado.	37
Figura 18. Esquema de integración del sistema de control	37
Figura 19. Diagrama de proceso.	38
Figura 20. Tarjeta Arduino Mega 2560 R3.	41
Figura 21. Modelado conjunto de transmisión de movimiento.	42
Figura 22. Modelado carro de inyección.	42
Figura 23. Modelo CAD del inyector con Autodesk Inventor.	43
Figura 24. Explosionado del inyector.	43
Figura 25. Esquema del circuito de control del sistema de inyección.	45

Figura 26. Modelado CAD de piezas fabricadas para el sistema de centrifugado	50
Figura 27. Imagen renderizada del dosificador	50
Figura 28. Esquema del circuito de control del sistema de centrifugado.	51
Figura 29. Curva de calibración del sistema de centrifugado.	53
Figura 30. Fuente de voltaje DC	54
Figura 31. Mecanismo inicial de variación de tensión.	55
Figura 32. Esquema del circuito de control del sistema de campo eléctrico.	56
Figura 33. Curva de calibración del nivel de tensión.	57
Figura 34. Esquema del circuito de energización de componentes AC.	58
Figura 35. Componentes adquiridos para el sistema de inyección.	59
Figura 36. Ensamble del Inyector.	60
Figura 37. Inyector construido.	60
Figura 38. Esquema de conexión driver A4988.	61
Figura 39. Componentes del sistema de centrifugado.	63
Figura 40. Dispositivo de medición de velocidad.	63
Figura 41. Soporte para servomotor.	64
Figura 42. Montaje del sistema de campo eléctrico.	65
Figura 43. Modelamiento tarjeta principal de control vista superior.	66
Figura 44. Modelamiento tarjeta principal de control vista inferior.	66
Figura 45. Fuente 24V DC alimentación de circuitos de control.	67
Figura 46. Tarjeta principal de control Implementada.	67
Figura 47. Pantalla LCD Táctil y Shield compatible con Arduino Mega.	69
Figura 48. Menú programado en la pantalla.	70
Figura 49. Interfaz de variación de parámetros.	71
Figura 50. Disposición de componentes del equipo.	72
Figura 51. Despiece del equipo de electrohilado por centrifugado (1).	73
Figura 52. Despiece del equipo de electrohilado por centrifugado (2).	74

Figura 53. Fotografía disposición de elementos.	75
Figura 54. Modelado del sistema de centrifugado.	77
Figura 55. Despiece del sistema de centrifugado.	78
Figura 56. Elementos del sistema de centrifugado.	79
Figura 57. Maquinado del dosificador.	80
Figura 58. Conductor de alta tensión.	81
Figura 59. Panel de control.	82
Figura 60. Sistema de ventilación del panel de control.	83
Figura 61. Pruebas de velocidad rotacional.	84
Figura 62. Equipo de electrohilado por centrifugado.	86
Figura 63. Colocación de PLA a electrohilar.	86
Figura 64. Manguera inyector - dosificador.	87
Figura 65. Primeras membranas de fibras electrohiladas.	88
Figura 66. Fibras electrohiladas.	88
Figura 67. Captura 1 del microscopio electrónico.	89
Figura 68. Captura 2 del microscopio electrónico.	89

## RESUMEN

Con la aplicación de la técnica de electrohilado por centrifugado, son aprovechados el campo eléctrico y la fuerza centrífuga simultáneamente, permitiendo la producción de nanofibras poliméricas en mayor volumen y menor tiempo, abriéndose camino tanto en la industria como en centros de investigación. Este trabajo presenta el diseño e implementación del sistema de control automático para un equipo de ésta naturaleza. Se parte de la identificación de las características del proceso de electrohilado, definiendo los parámetros y determinando las estrategias de control, luego mediante la aplicación de teorías para el diseño electromecánico se realizan los cálculos y modelamientos necesarios para cada uno de los componentes pertenecientes al equipo. Se diseña e implementa una interfaz de usuario que permite establecer valores a cada uno de los parámetros de operación, así como energizar componentes de potencia y dar comienzo o parada al proceso. Finalmente se muestra la puesta a punto del equipo con el sistema de control implementado, y los resultados de las pruebas de funcionamiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a sus innovadoras aplicaciones, las nano y microfibras poliméricas han despertado el interés de los investigadores en las últimas décadas, ya que aprovechando sus excelentes propiedades físicas, químicas mecánicas y biológicas, y debido a su diámetro manométrico y al perfeccionamiento en su estructura interna; las nanofibras son empleadas en diferentes áreas industriales para la fabricación de sensores, separadores de baterías, transistores, almacenamiento de energía, tecnología de la información, cosméticos, prendas de vestir, entre otros<sup>1</sup>. En cuanto a materiales, las investigaciones se han centrado en el desarrollo de nanofibras de polímeros biodegradables como el poli-ácido láctico (PLA), las cuales presentan grandes ventajas mecánicas y morfológicas para ser utilizadas como andamios para controlar y dirigir la reconstrucción de tejidos en el cuerpo humano<sup>2</sup>.

Para la preparación de este tipo de fibras se han desarrollado algunas técnicas como la separación de fases, el auto ensamble, la extrusión continua, el electrospinning entre otras. Entre éstas, la técnica del electrospinning es la más prometedora y versátil para la producción de redes de nano y microfibras<sup>3</sup>, sin embargo, la implementación del proceso de electrohilado se encuentra muy limitada especialmente en el sector industrial, principalmente por inconvenientes como la baja tasa de producción y el control de cada uno de los parámetros de operación.

A pesar de que en el país la implementación de éstas tecnologías es poca, a partir del 2014 la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a través del grupo de investigación “Desarrollo y Aplicación de Nuevos materiales (DANUM)”, ha incursionado en estos desarrollos diseñando y construyendo un equipo de electrohilado basados en la técnica tradicional conocida como “electrohilado con

---

<sup>1</sup> JAYARAMAN K, Kotaki M, Zhang Y, Mo X, Ramakrishna S (2004). Recent advances in polymer nanofibers. *J Nanosci Nanotechnol* 4: 52–65, p 2.

<sup>2</sup> GÓMEZ PACHÓN, Edwin Yesid, Montiel Campos Raúl, Moreno Rondón Eyleen Vanessa, Vera-Graziano Ricardo (2010). Diseño de un equipo de electrospinning para la fabricación de andamios de nanofibras para aplicaciones biomédicas, p 1.

<sup>3</sup> AMALORPAVA, Mary, Senthilram T, Suganya S, Nagarajan J. Venugopal, Ramakrishna S, V. R. Giri Dev (2012). Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery Vehicle. *EXPRESS Polymer Letters* Vol.7, No.3 238–248.

inyector de aguja”, con el cual están obteniendo microfibras de almidón de papa, nanofibras de celulosa y otros tipos de polímeros.

Este proyecto se enmarca dentro del convenio interinstitucional específico, que se firmó y que se viene desarrollando entre la UPTC y el Instituto de investigaciones en Materiales-IIM de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, y debido a que bajo la convocatoria SGI 1769 de la Dirección de Investigaciones de la Uptc DIN fueron adquiridos los componentes mecánicos y de potencia necesarios para la construcción del equipo, fue posible diseñar e implementar un sistema de control automático, obteniendo un instrumento que permite generar fibras poliméricas y que puede ser empleado en investigaciones experimentales para ver los efectos de las diferencias de potencial eléctrico en combinación con otros fenómenos físicos tales como los rotacionales y los cambios de propiedades físicas que sufrirán los fluidos poliméricos.

Con el desarrollo del equipo de electrohilado por centrifugado, y de la implementación de técnicas de control y automatización, se contribuye en la preparación de membranas de nanofibras poliméricas, facilitando la producción y reduciendo las limitaciones a las que se enfrentan investigadores tanto de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC como de otros centros de investigación en el país por la insuficiencia de equipos y procesos controlados y automatizados.

Este documento presenta los resultados del Diseño e implementación de un sistema de control automático para un equipo experimental de electrohilado por centrifugado de nanofibras poliméricas, a partir de la definición de parámetros, la determinación de estrategias de control, el diseño del sistema en sus componentes electromecánicos y de control, la implementación y puesta a punto del equipo mediante la adecuación y validación del sistema a partir de la evaluación de los parámetros operativos del proceso de producción de nano fibras poliméricas y del desarrollo de una interfaz de usuario que permita su operación a partir de comandos simples. Con el fin de que se genere además de la apropiación de nuevos conocimientos y la optimización del proceso de producción de nanofibras poliméricas, bases para el desarrollo de posteriores proyectos de investigación dentro del Grupo de Investigación en Energías y Nuevas Tecnologías GENTE y de los demás colaboradores, en análisis de futuras propuestas de control y automatización de equipos y procesos.

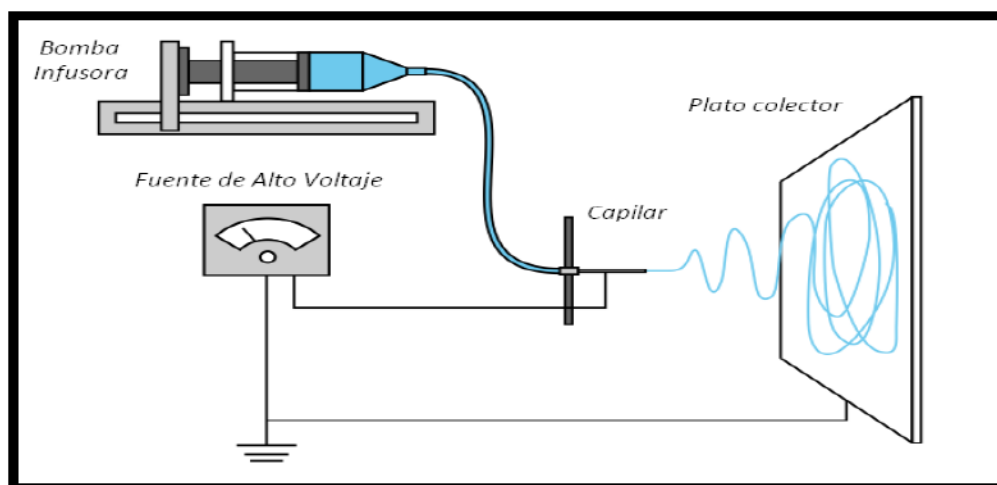
La metodología desarrollada, es de tipo experimental, y tuvo en cuenta el desarrollo de 8 fases desde la revisión documental, la determinación de parámetros operativos, la definición de estrategias de control, el diseño del sistema de control seguido de su construcción, el análisis de funcionamiento y puesta a punto del equipo y finalmente la entrega de resultados.

En el capítulo 2, se hace referencia a los tipos de procesos de electrohilado, las aplicaciones, los parámetros del proceso, la caracterización de fibras producidas y sistemas de control. En el capítulo 3, se definen los parámetros del equipo de electrohilado por centrifugado y se determinan las estrategias de control. En el capítulo 4, se establece el funcionamiento del equipo a través de los diagramas de proceso y de flujo y se presenta todo lo referente al diseño de cada uno de los sistemas que componen el equipo, como lo son modelamientos matemáticos, curvas de comportamiento, circuitos de control y diseño mecánico de componentes necesarios. En el capítulo 5, se muestra la construcción de componentes mecánicos, la implementación de sistemas de control y la integración de la interfaz de la interfaz de usuario, así como el ensamble y la puesta a punto del equipo de electrohilado por centrifugado. En el capítulo 6, se indican los resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas al sistema de control automático, así como información de apoyo para el manejo y mantenimiento del equipo de electrohilado por centrifugado. Por último, en los capítulos 7 y 8 se plantean las conclusiones, recomendaciones y logros alcanzados con el proyecto de investigación.

## 2. MARCO TEÓRICO

El proceso de electrohilado de nanofibras poliméricas representado en la figura 1, consiste en someter un polímero disuelto en un solvente volátil a un campo eléctrico generado por la aplicación de altas tensiones entre la boquilla de un dosificador y un colector, haciendo que las fuerzas del campo eléctrico superen las fuerzas de la tensión superficial en la solución de polímero cargado, de esta forma a un voltaje determinado, finos chorros de solución son expulsados desde el capilar hacia el plato colector. Posteriormente el chorro se mueve en la dirección del campo eléctrico, alargándose de acuerdo con las fuerzas externas e internas, seguidamente el disolvente se evapora y los segmentos de fibras son depositados al azar en el colector el cual debe ser construido con lámina de metal conductor eléctrico.

Figura 1. Sistema representativo del electrohilado por inyección de aguja.



Fuente: Franky Asael Prado Amaro (2014). Diseño de un minisistema electrospinning. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, ipn. Universidad Tecnológica de Querétaro.

El resultado son membranas conformadas por redes porosas de fibras superpuestas muy delgadas, las cuales facilitan la entrada y salida de fluidos haciéndolas importantes para diferentes aplicaciones como en filtros y en la regeneración de tejidos como andamios celulares. El proceso mencionado describe la técnica tradicional conocida como electrohilado por inyección de aguja,

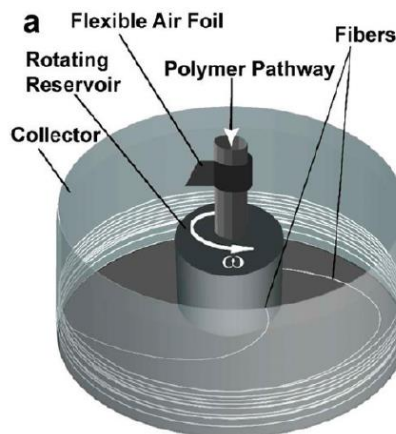


la cual según Franky<sup>4</sup> fue Antonin Formhals quien la patentó en 1934, y desde entonces ésta ha sido la técnica empleada para la producción de la mayoría de membranas de nanofibras en todo el mundo; cabe mencionar que ésta requiere de tiempos demasiado largos para la producción de una pequeña membrana de tejido nanométrico; desde entonces han surgido diferentes modificaciones de ésta, así como propuestas de otros tipos de técnicas para la producción de nanofibras poliméricas en busca de lograr procesos mucho más eficientes reduciendo los tiempos, y aumentando el tamaño de las membranas.

## 2.1 ELECTROHILADO POR CENTRIFUGADO

Esta técnica conserva algunas características de la técnica tradicional como lo es la aplicación de altas tensiones, pero básicamente se diferencia en la forma y funcionamiento del sistema de inyección, el cual consiste en un plato dosificador con algunas cavidades micrométricas por las cuales es expulsada la solución polimérica gracias a la fuerza centrífuga a la que se somete, puesto que dicho dosificador está acoplado al eje de un motor DC que gira a velocidades entre 900 y 7000 rpm, como se muestra en la figura 2, una vez que la solución sale del dosificador se forman hilos que son atraídos hacia el colector gracias a la presencia del campo eléctrico presente al conectar tanto al dosificador (por medio de un sistema de escobillas) como el colector a cada terminal de una fuente de tensión DC variable entre 5 y 25 kV.

Figura 2. Esquema del proceso de hilado por centrifugado.



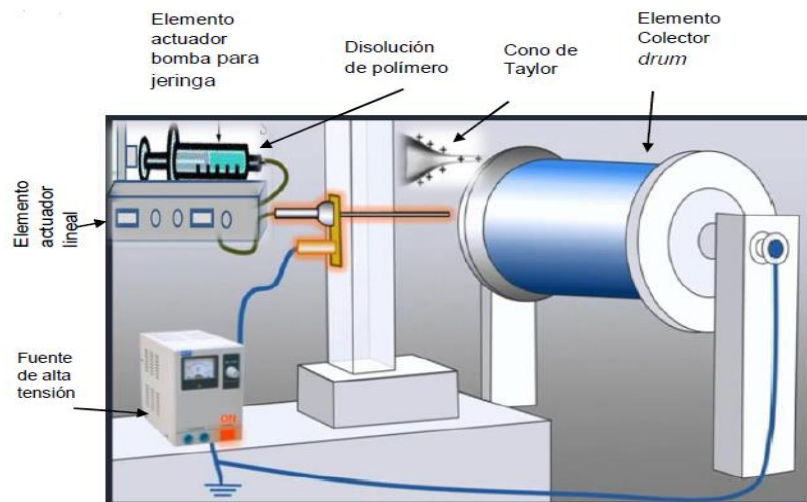
Fuente: Mohammad Reza Badrossamay, Holly Alice McIlwee, Josue A. Goss, and Kevin Kit Parker. Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning. Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138.

<sup>4</sup> PRADO AMARO, Franky Asael (2014). Diseño de un minisistema electrospinning. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, ipn. Universidad Tecnológica de Querétaro.

## 2.2 OTROS TIPOS DE PROCESOS DE HILADO DE FIBRAS POLIMÉRICAS

Existen diferentes mecanismos de montaje para llevar a cabo la técnica tradicional conocida como electrohilado por inyección de aguja, algunos de éstos emplean un colector que funciona como un mandril rotativo tal como se muestra en la Figura 3. La técnica puede ser desarrollada tanto de forma horizontal como vertical, aunque el principal inconveniente al trabajar en posición vertical es la posible salida de gotas de solución desde el capilar hacia el plato colector debido a los efectos de la gravedad, las cuales pueden caer sobre las fibras depositadas haciendo defectuosa la superficie de las mismas e interrumpiendo el proceso.

Figura 3. Sistema representativo del electrospinning.



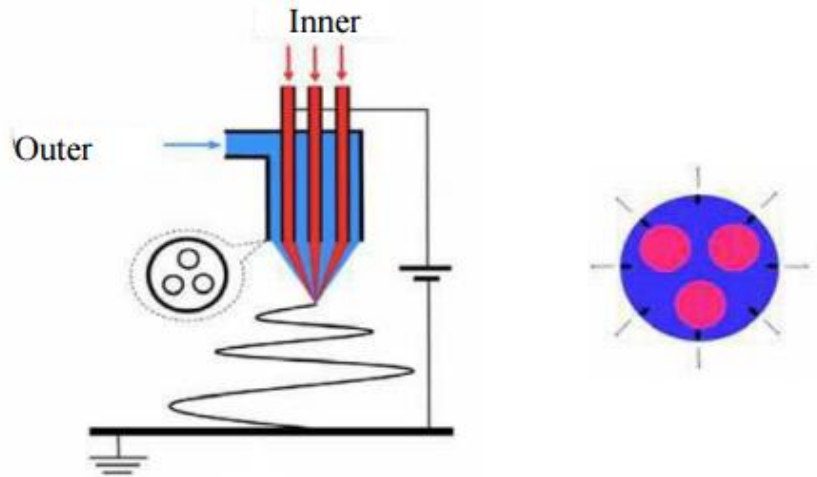
Fuente: Franky Asael Prado Amaro (2014). Diseño de un minisistema electrospinning. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, ipn. Universidad Tecnológica de Querétaro.

De acuerdo con Mahabub<sup>5</sup> algunas de las modificaciones que se han implementado a la técnica tradicional corresponden a los métodos de “Multi-channel coaxial electrospinning” cuyo esquema se muestra en la Figura 4, y al método de “multiple stream electrospinning” es decir electrohilado de múltiple flujo; con el cual se obtienen nanofibras empleadas en el vendaje de heridas, básicamente el método consiste en la inyección simultánea de varios tipos de

<sup>5</sup> Md. MAHABUB Hasan, A.K.M. Mashud Alam, Khandakar Abu Nayem. Application of Electrospinning techniques for the production of tissue engineering scaffolds, review (2014). European Scientific Journal. ISSN: 1857 – 7881.

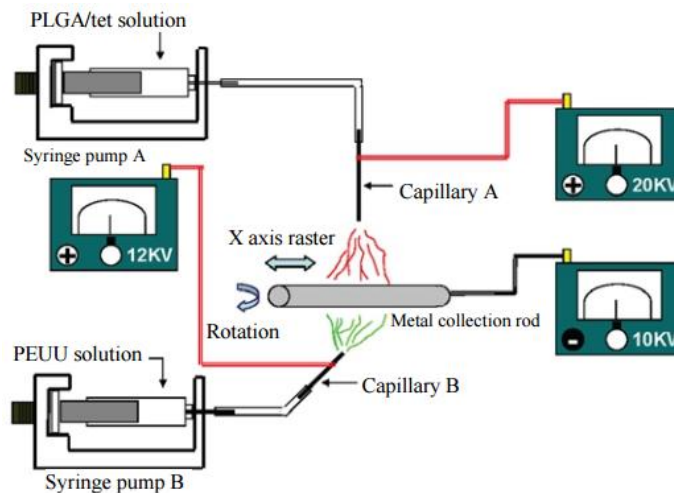
polímeros sometidos a diferentes tensiones; el esquema representativo se muestra en la Figura 5.

Figura 4. Método Multi-channel coaxial electrospinning.



Fuente: Md. Mahabub Hasan, A.K.M. Mashud Alam, Khandakar Abu Nayem. Application of Electrospinning techniques for the production of tissue engineering scaffolds, review (2014). European Scientific Journal. ISSN: 1857 – 7881.

Figura 5. Electrohilado de Doble flujo.



Fuente: Md. Mahabub Hasan, A.K.M. Mashud Alam, Khandakar Abu Nayem. Application of Electrospinning techniques for the production of tissue engineering scaffolds, review (2014). European Scientific Journal. ISSN: 1857 – 7881.

Se han desarrollado otros arreglos específicamente sobre el sistema de inyección como lo son la aplicación de calor directamente a la aguja con lo cual se logra un mejor control sobre la viscosidad adecuada del polímero justo en el momento en que son atraídas por el campo eléctrico tal como lo indica Cicero<sup>6</sup> llamando tal técnica como el electro melt spinning, también se ha desarrollado el electro hilado bajo humedad (electro- wet spinning) el cual Según Chang<sup>7</sup> consiste en sumergir el colector en algún tipo de disolvente como etanol, diclorometano, dimetilformamida u otras, dependiendo del tipo de polímero a electrohilar; con el fin de obtener fibras más alineadas u orientadas también han sido implementados diferentes tipos de colectores rotativos o paralelos.

Además de las técnicas mostradas como modificaciones de la técnica de electrohilado por inyección de aguja existen otros métodos en fase experimental que proponen un aumento significativo en la velocidad del tejido, en el rendimiento y en la calidad de producción lo cual está relacionado con la obtención de fibras más alineadas y con menores diámetros, algunas de éstas técnicas desarrolladas basadas en el needlesh electrospinning (electrohilado sin aguja) son: el ball spinning (hilado por esferas), el electrohilado con campos magnéticos y el centrifugal spinning (hilado por centrifugado).

## **2.3 APLICACIONES**

Actualmente las investigaciones se han centrado en el desarrollo de nanofibras de polímeros biodegradables como el poli-ácido láctico (PLA), las cuales presentan grandes ventajas mecánicas y morfológicas para ser utilizadas como andamios para controlar y dirigir la reconstrucción de tejidos en el cuerpo humano<sup>8</sup>, entre otras aplicaciones médicas tales como reemplazo de huesos, implantes dentales, sistemas de liberación de fármacos, injertos vasculares y vasos sanguíneos artificiales. Además, aprovechando sus excelentes propiedades físicas, químicas mecánicas y biológicas, y debido a su diámetro manométrico y al perfeccionamiento en su estructura interna; las nanofibras son empleadas en diferentes áreas industriales para la fabricación de sensores, separadores de

---

<sup>6</sup> CICERO Jhon A. and Dorgan Jhon R. (2002) Physical properties and Fiber morphology of poly(lactic acid) obtained from Continuous Two-Step Melt Spinning. Journal of Polymers and the Environment.

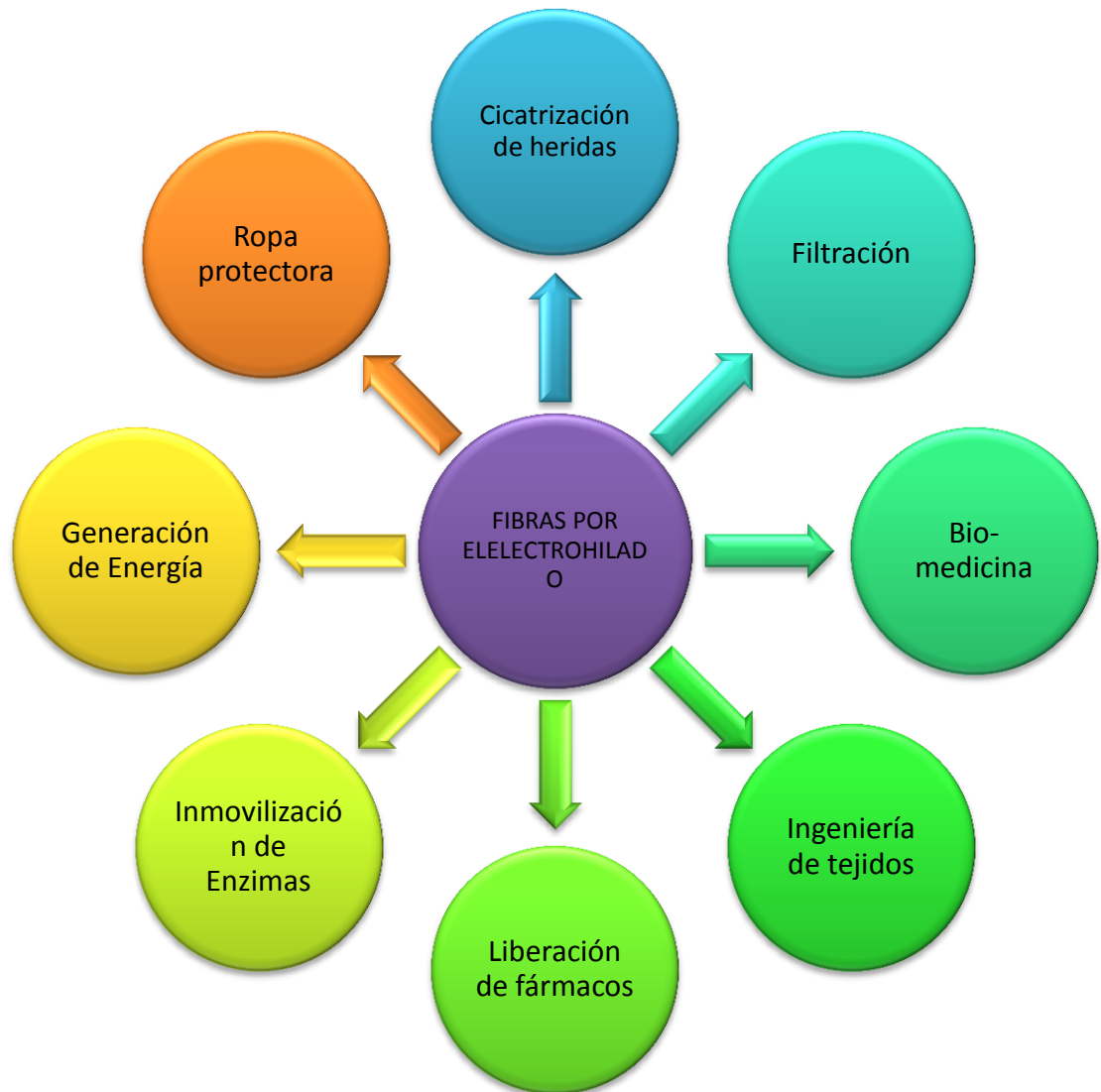
<sup>7</sup> CHANG, Kee Lee, Seon Jeong Kim, Sun I Kim, Byung-Ju Yi and Seog Young Han (2006). Preparation of chitosan microfibres using electro-wet-spinning and their electroactuation properties. Institute of physics. DOI:10.1088/0964-1726/15/2/044

<sup>8</sup> GÓMEZ PACHÓN. Op. cit., p 2.

baterías, transistores, almacenamiento de energía, tecnología de la información, cosméticos, prendas de vestir, entre otros<sup>9</sup>.

En la Figura 6 se muestran algunas de las aplicaciones más usuales de las nanofibras preparadas por electrohilado.

Figura 6. Aplicaciones de las fibras electrohiladas.



Fuente: Autores del proyecto.

---

<sup>9</sup> JAYARAMAN. Op. cit., p 5.

## 2.4 PARÁMETROS DEL PROCESO DE ELECTROHILADO

El proceso de electrohilado depende de una serie de parámetros que tal como se enuncia en Tesis.uson<sup>10</sup> quién los clasifica como: Parámetros de la Solución, Parámetros de operación y Parámetros Ambientales, y cuyo análisis se hace a continuación:

### Parámetros de la Solución:

**Viscosidad:** Tiene un papel determinante en el tamaño de la fibra y morfología durante el proceso de hilado. Se ha encontrado que a muy bajos valores de viscosidad no se presenta una formación continua de fibra, mientras que a valores muy altos de viscosidad hay una gran dificultad en la expulsión de fibra de la solución polimérica, por lo que un valor óptimo de viscosidad es requerido para formar nanofibras por electrohilado. La viscosidad de la solución ha sido estrechamente relacionada a la concentración de la solución. La relación entre la viscosidad o la concentración de fibras obtenidas por electrohilado, ha sido estudiada en diversos sistemas como poliácido láctico-co-glicólico (PLGA), polivinil alcohol (PVA), polietil-metacrilato (PMMA), poliestireno (PS), gelatina, entre otros.

En soluciones poliméricas de muy alta viscosidad se presenta usualmente mayores tiempos de relajación, lo que puede prevenir la fractura del hilo expulsado durante el proceso. Un aumento en la viscosidad o concentración de la solución origina un mayor y más uniforme diámetro en la fibra. El valor de la viscosidad es determinante para formar fibras continuas. En soluciones de baja viscosidad, la tensión superficial es el factor dominante, y solo es posible la formación de grumos o fibras grumosas; mientras que a valores por encima de una concentración crítica se obtiene una estructura fibrosa continua cuya morfología es afectada por el valor de la concentración.

**Concentración:** Para que ocurra la formación de una fibra por electrohilado, se requiere una determinada concentración mínima de la solución. A bajas concentraciones, se ha observado que se obtiene un conjunto de grumos y, al ir aumentando el valor de la concentración, la forma de estos grumos hasta llegar a formarse una fibra completamente uniforme con diámetros cada vez mayores. Sin embargo, a muy altas concentraciones las fibras no son continuas debido a la incapacidad que se presenta para mantener el flujo de la solución en la punta del capilar impidiendo la formación de hilos o fibras largas.

---

<sup>10</sup> TESIS.USON. [en línea] Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22289/Capitulo4.pdf>. Consultado 29 de octubre de 2015.

**Tensión Superficial:** Esta propiedad es una función de la composición del solvente utilizado. Entre menor sea la tensión superficial de la solución polimérica las fibras obtenidas presentarán ausencia de grumos. Los solventes contribuyen a diferentes valores de tensión superficial. Una tensión superficial muy elevada inhibe el proceso de electrohilado ya que se presenta mucha inestabilidad del hilo expulsado y la formación de gotas. Valores bajos de tensión superficial de la solución ayudan a que el electrohilado pueda darse a valores menores de campo eléctrico. Sin embargo, no es posible concluir que valores pequeños de tensión superficial son favorecedores para formar fibras. Básicamente la tensión superficial determina los límites superior e inferior del rango dentro del que es posible la formación uniforme de fibras, si todas las demás variables se mantienen constantes.

**Peso Molecular:** El peso molecular del polímero tiene un efecto significativo en las propiedades reológicas y eléctricas tales como viscosidad, tensión superficial, conductividad y fuerza dieléctrica. Generalmente se utilizan polímeros de altos pesos moleculares ya que proveen la viscosidad necesaria para la formación de fibras. Se ha observado que soluciones de polímeros con muy bajo peso molecular tienden a formar grumos, mientras que soluciones con polímeros de muy alto peso molecular forman largas fibras de mayor diámetro en promedio.

**Conductividad:** Debido a que una amplia variedad de polímeros son conductores los iones cargados en la solución polimérica tienen una gran influencia en la formación del hilo expulsado. La conductividad de la solución está principalmente determinada por el tipo de polímero empleado, el solvente utilizado, y la disponibilidad de sales que se pueden ionizar. Al aumentarse la conductividad eléctrica de la solución, se presenta una disminución significativa en el diámetro de la nanofibras mientras que a bajas conductividades de la solución, resulta una elongación deficiente del hilo expulsado, formando fibras no uniformes que incluso pueden llegar a tener grumos.

#### **Parámetros de Operación:**

**Velocidad de Flujo:** La velocidad de flujo desde la jeringa es un parámetro importante de proceso ya que determina la velocidad del chorro expulsado y la velocidad de salida de materia de la jeringa. Una velocidad de flujo baja es deseable para dar tiempo suficiente al solvente para su evaporación. Por otro parte a altas velocidades de flujo las fibras obtenidas contienen grumos debido a la incapacidad de un secado apropiado del solvente antes de alcanzar el colector.

**Voltaje Aplicado:** Solamente hasta alcanzar el voltaje de umbral ocurre la formación de fibras ya que se induce la carga necesaria en la solución con el campo eléctrico para iniciar el proceso de electrohilado.

En la mayoría de los casos, los voltajes altos causan un mayor alargamiento de la fibra debido a las fuerzas Coulómbicas en el chorro, así como también a un campo eléctrico más fuerte. Todo esto resulta en una reducción del diámetro de la fibra y en una rápida evaporación del solvente. Sin embargo, a muy altos voltajes hay mayor probabilidad de formación de grumos o aglomerados poliméricos.

**Distancia de la aguja al colector:** La distancia entre la aguja y el colector es otro de los medios de control del diámetro y morfología de fibras en el proceso de electrohilado.

Una distancia apropiada es requerida para darles a las fibras tiempo suficiente para secarse antes de llegar al colector, de otra forma a distancias muy cortas o muy largas se obtienen grumos e incluso gotas de solvente que no se alcanzan a evaporar.

#### **Parámetros Ambientales:**

Los parámetros ambientales que incluyen la humedad, la temperatura, etc. con el aumento de la temperatura se producen fibras de menores diámetros. Al aumentar la humedad ambiental se presenta una aparición de pequeños poros circulares en la superficie de las fibras, en contraparte en ambientes casi secos o de muy poca humedad, un solvente volátil se evapora más rápidamente. Puede suceder que la velocidad de evaporación sea demasiado rápida, comparada con la eliminación del disolvente en la punta de la aguja por lo cual se crea una deficiencia en el proceso de electrohilado al taparse la aguja después de pocos minutos de haber empezado el proceso.

## **2.5 CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS PREPARADAS POR ELECTROHILADO**

La caracterización de fibras producidas por el proceso de electrohilado es una de las más difíciles tareas, ya que no son aplicables las técnicas convencionales de caracterización de materiales para estudiar una sola fibra. Para entender los resultados obtenidos mediante el proceso, los estudios deben ser realizados con precisión, desde la selección del polímero hasta las pruebas mecánicas. Algunas de las técnicas empleadas para la caracterización de fibras son: Caracterización Geométrica siendo la Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) actualmente la



más empleada con la cual se logra analizar el tamaño promedio de los diámetros de las fibras y demás características morfológicas, Caracterización Química y Caracterización Mecánica.

## **2.6 SISTEMAS DE CONTROL**

De acuerdo a lo enunciado en upcommons<sup>11</sup>: un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos: Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos, ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido, normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales, ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador. Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes: Sensores los cuales permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema, controlador quien utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia y actuador que es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

### **2.6.1 Control en lazo Cerrado**

Un sistema de control en lazo cerrado es aquel que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, éste también se denomina sistema de control realimentado en el cual se alimenta al controlador con la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal

---

<sup>11</sup> UPCOMMONS.upc. [en línea] Disponible en:  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>  
Consultado 19 de noviembre de 2015.

de salida, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado<sup>12</sup>.

### **2.6.2 Control en lazo Abierto**

Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada; en este tipo de sistema a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija, en consecuencia la precisión del sistema depende de la calibración, un sistema de control en lazo abierto sólo se debe usar si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no existen perturbaciones internas ni externas.

### **2.6.3 Controladores Proporcionales**

Este tipo de controladores emplean un sistema de realimentación, de tal forma que la salida depende directamente de la diferencia entre el valor deseado y el valor medido a lo cual se reconoce como error. La acción de control realiza una regulación de la potencia entregada en función del error calculado por el mismo sistema.

El control proporcional es el tipo de control que utilizan la mayoría de los controladores que regulan la velocidad de un automóvil; si el automóvil se encuentra moviéndose a velocidad objetivo y la velocidad aumenta ligeramente, la potencia se reduce ligeramente, o en proporción al error; de modo que el automóvil reduce la velocidad poco a poco aproximándola a la velocidad objetivo, el resultado es un control de velocidad muy suave<sup>13</sup>. En la práctica consiste en hacer la medición de velocidad en la salida, compararla con el valor establecido en la entrada, calcular la diferencia o error y finalmente hacer la corrección llevando el valor del error hasta un valor mínimo por debajo de un error permitido.

---

<sup>12</sup> KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de control moderna. PEARSON EDUCACIÓN, S.A, Madrid, 2010. ISBN: 979-84-8322-660-5. p. 7.

<sup>13</sup> INVESTIGACIÓN CONTROLADORES. Club Ensayos. [en línea] Disponible en: <https://www.clubensayos.com/Tecnolog%C3%ADas/Investigacion-Controladores/1703442>. Consultado 15 de junio de 2016.

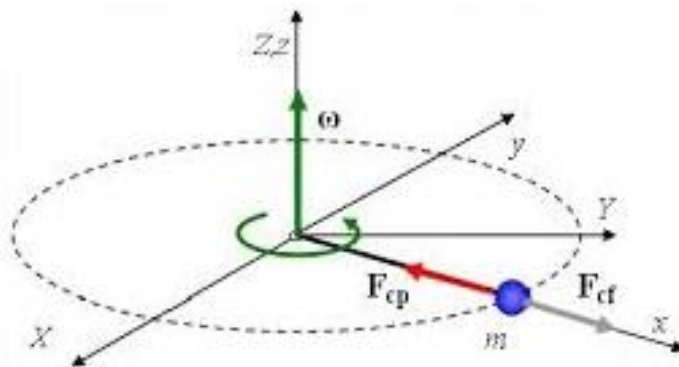
## 2.7 OTROS PRINCIPIOS Y TEORÍAS

### Fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga es la fuerza que se opone en los movimientos de rotación, por lo cual tiende a alejar los objetos del centro, generando un radio que se crece a medida que la fuerza aumenta. Está basada en un eje de referencia giratorio, respecto al cual un objeto que gira a su alrededor crea una fuerza no visible hacia afuera, a medida que la velocidad de rotación aumenta, también aumenta el valor de la fuerza centrífuga.

Éste fenómeno pertenece a la mecánica newtoniana junto con su opuesta la fuerza centrípeta esquematizadas en la figura 7, y tiene como característica el hecho de que es una magnitud a la que no se le aprecia la sensación desde el punto de vista de un observador inercial.

Figura 7. Esquema representativo de la fuerza centrífuga



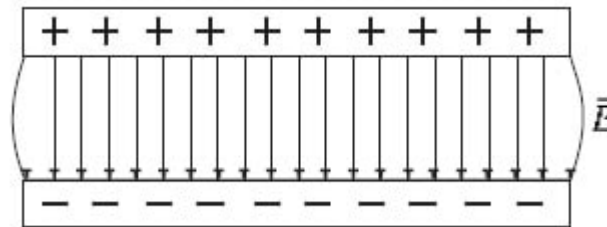
Fuente: <http://fisica1bruno.blogspot.com.co/2010/09/realmente-existe-la-fuerza-centrifuga.html>.

El lanzamiento de partículas por efecto del centrifugado es empleado en muchas aplicaciones como en las calderas de vapor, donde el carbón entra por el centro y es lanzado por fuerza centrífuga contra las paredes de la batea para ser pulverizado entre los rodillos, o en la sedimentación donde los componentes más densos de la mezcla son separados fuera del eje de rotación por la fuerza centrífuga.

## Campo eléctrico

La diferencia de potencial o tensión entre dos puntos  $\Delta V$ , genera un campo eléctrico, de tal forma que una partícula cargada positivamente presente en tal campo es trasladada de un punto al otro desde el de mayor hacia el de menor potencial eléctrico tal como se muestra en la figura 8, en dicha acción se puede decir que se realizó un trabajo eléctrico.

Figura 8. Dirección del campo eléctrico



Fuente: <http://www.blogdefisica.com/campo-electrico-uniforme.html>

Entonces se puede considerar a un campo eléctrico como una región del espacio cuyas propiedades han sido modificadas por la presencia de una carga eléctrica, de tal modo que al introducir en dicho campo eléctrico una nueva carga eléctrica, ésta experimentará una fuerza.

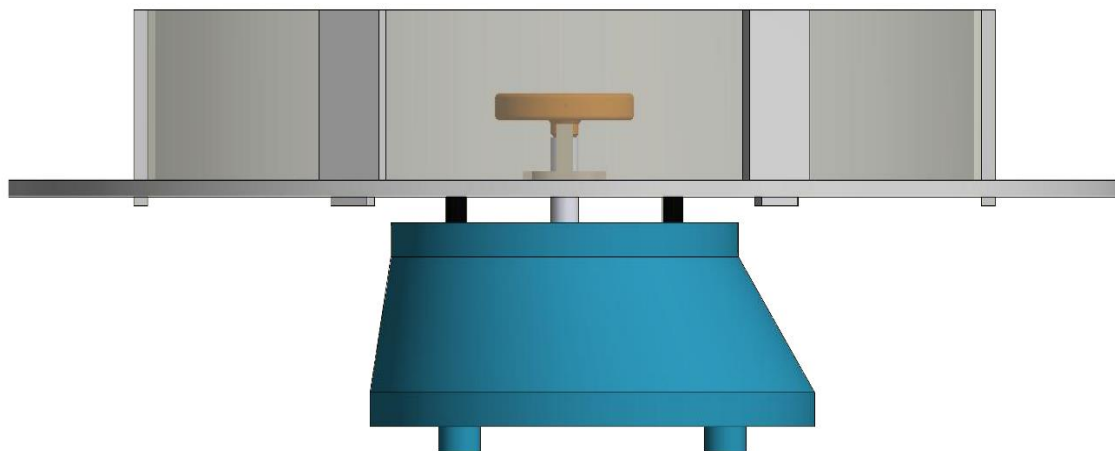
Las aplicaciones más relevantes del campo eléctrico están relacionadas con la transmisión de señales de información a distancia sin necesidad de cables, a través de las ondas generadas por el campo eléctrico, como son los casos del radar y de las señales de televisión y radio. Aunque en general cualquier señal eléctrica que viaja por un campo eléctrico ya que contiene electrones en movimiento.

### 3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y DETERMINACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

El equipo a construir, junto con su sistema de control automático, es una necesidad primordial para el grupo de investigación en Desarrollo y Aplicaciones de Nuevos Materiales - DANUM de la UPTC, con el objetivo de facilitar la experimentación de sus investigadores con ésta nueva técnica de preparación de fibras poliméricas, ellos anteriormente han diseñado y construido un equipo de electrohilado con inyector de aguja (técnica tradicional), con el cual se están obteniendo microfibras de almidón de papa, nanofibras de celulosa y otros tipos de polímeros. Según sus requerimientos se pretende que en el equipo se controlen los parámetros más influyentes en el proceso, es decir los parámetros de operación; como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso comprende otros parámetros relacionados con el ambiente y la solución empleada, cuyo control no se contempla dentro de los alcances de éste proyecto, sino que se convertirá en investigaciones futuras a realizar por los investigadores del grupo DANUM o por otros grupos a quienes se deleguen, así como en éste caso al grupo GENTE.

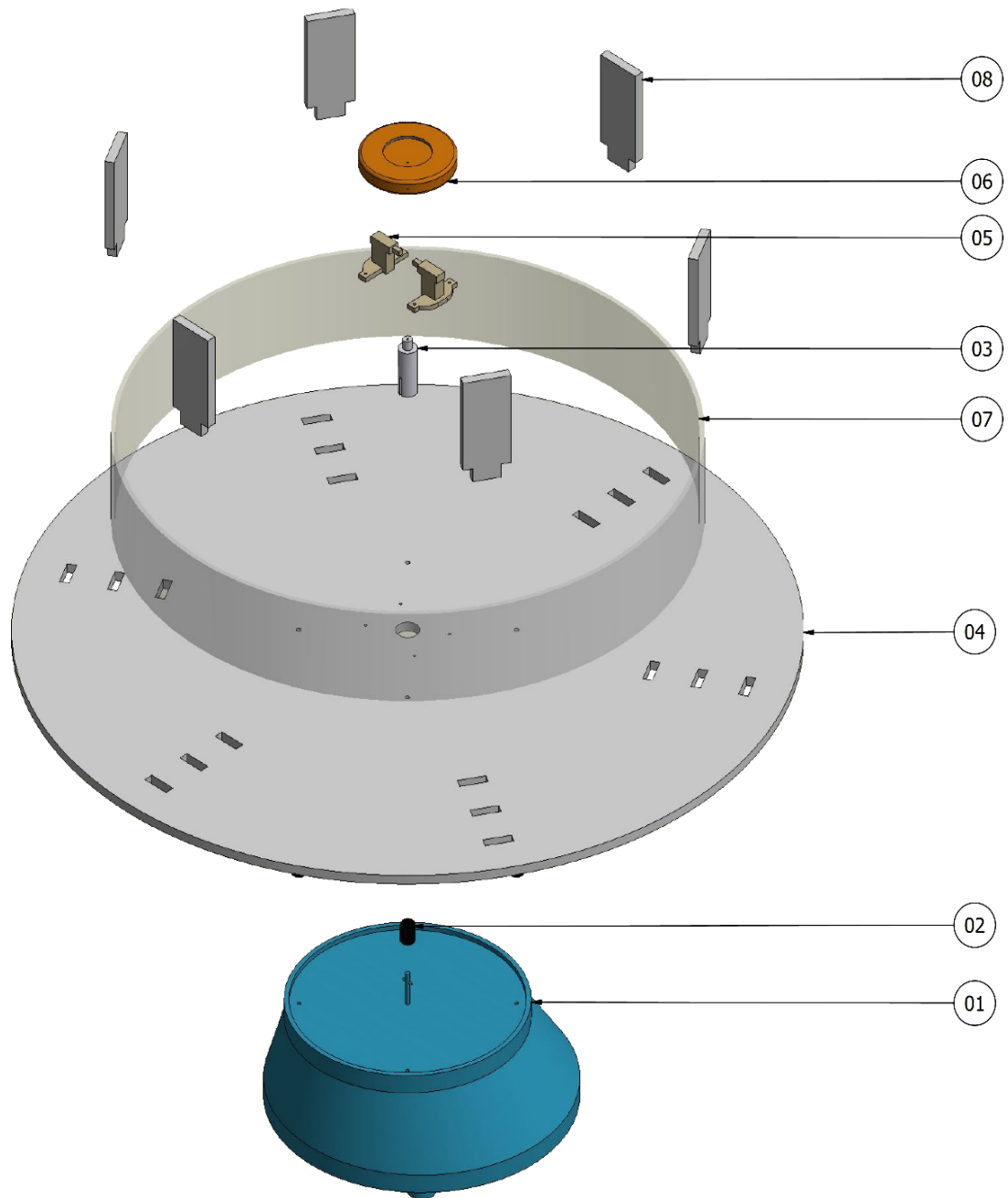
Para hacer una revisión detallada de los parámetros de operación que deben ser controlados en un equipo de electrohilado que emplea la técnica de centrifugado, se construyó un primer banco de pruebas, cuyo modelado y despiece se muestran en las figuras 9 y 10 respectivamente.

Figura 9. Modelado del banco de pruebas construido.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 10. Despiece del banco de pruebas construido.



*1 Máquina de algodón de azúcar, 2 tope de separación, 3 Extensión del eje en material aislante, 4 Soporte del colector, 5 porta escobillas de grafito, 6 plato dosificador, 7colector y 8 topes para ajustar el colector.*

Fuente: Autores del Proyecto.

### Consideraciones para el diseño de banco de pruebas:

La construcción del banco de pruebas, se basó en los referentes teóricos consultados, a los cuales se hace referencia en el capítulo 2 de éste trabajo; especialmente en la disposición mostrada por Badrossamay, McIlwee, Goss y Parker<sup>14</sup> en su trabajo “Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning”, la cual consiste de un motor en posición vertical, a cuyo eje es acoplado un disco dosificador con pequeños orificios, y de un anillo metálico usado como colector.

Como accionamiento de rotación, se empleó el motor de una máquina de algodón de azúcar la cual se muestra en la figura 11, se construyó un colector con lámina de Policloruro de vinilo – PVC, forrada en su interior por papel aluminio para facilitar la extracción de la fibras producidas. En la tabla 1 se muestran las características del banco de pruebas construido.

Figura 11. Máquina de algodón de azúcar empleada en banco de prueba.



Fuente: Autores del Proyecto.

---

<sup>14</sup> Mohammad Reza Badrossamay, Holly Alice McIlwee, Josue A. Goss, and Kevin Kit Parker. Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning. Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138.

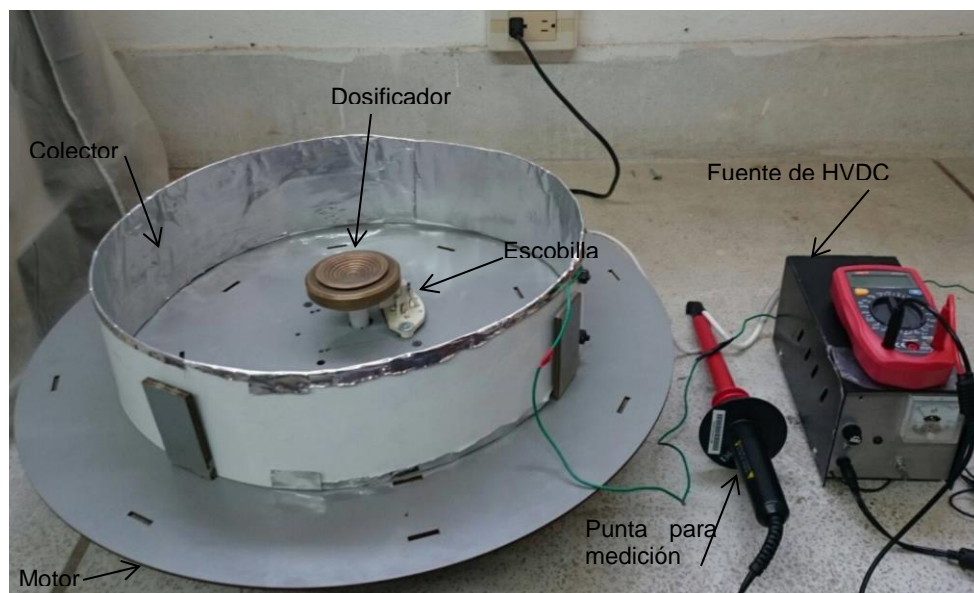
Tabla 1. Características del banco de pruebas.

CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS	
Distancia Dosificador - Colector	25 cm
Número de agujeros en dosificador	8
Diámetro de agujeros	0,8 mm
Velocidad de centrifugado	3000 rpm
Tensión aplicada	10 kV

Fuente: Autores del Proyecto.

El prototipo construido se muestra en la figura 12, con éste se experimenta inicialmente el posicionamiento sobre el colector de las partículas lanzadas por efectos de la fuerza centrífuga, obteniendo resultados exitosos, para ello el material empleado inicialmente fue glicerina por su bajo costo y por contar con una densidad similar a la del material polimérico poliácido láctico (PLA), con éste último también se centrifugó una vez validadas las pruebas con glicerina.

Figura 12. Primer banco de pruebas.

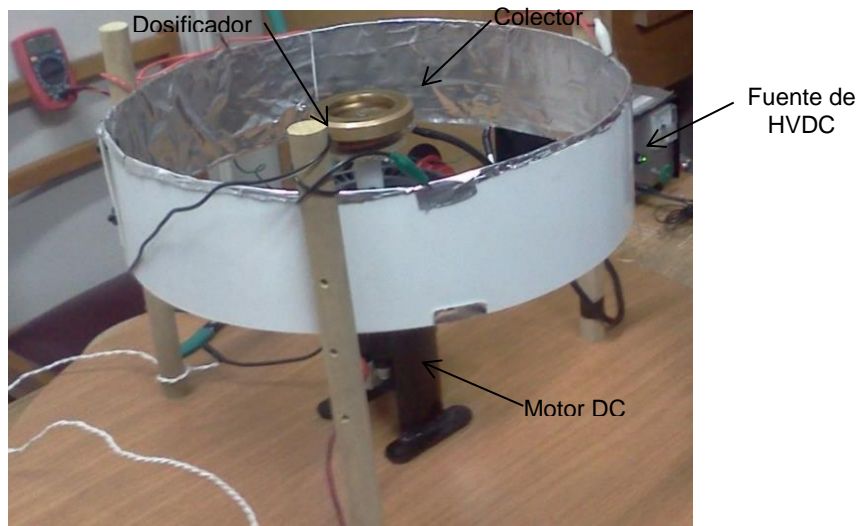


Fuente: Autores del Proyecto.



Posteriormente se desarrolla un segundo banco de pruebas, luego de haber adquirido componentes para la construcción del equipo, éste se muestra en la figura 13, con el cual se realiza un trabajo de experimentación a velocidad de centrifugado de 3000 rpm y a un nivel de tensión de 10 kV, produciendo fibras de poliláctico tal como se ilustra en las figuras 14 y 15.

Figura 13. Segundo banco de pruebas



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 14. Formación de fibras en el proceso de electrohilado



Fuente: Autores del Proyecto.

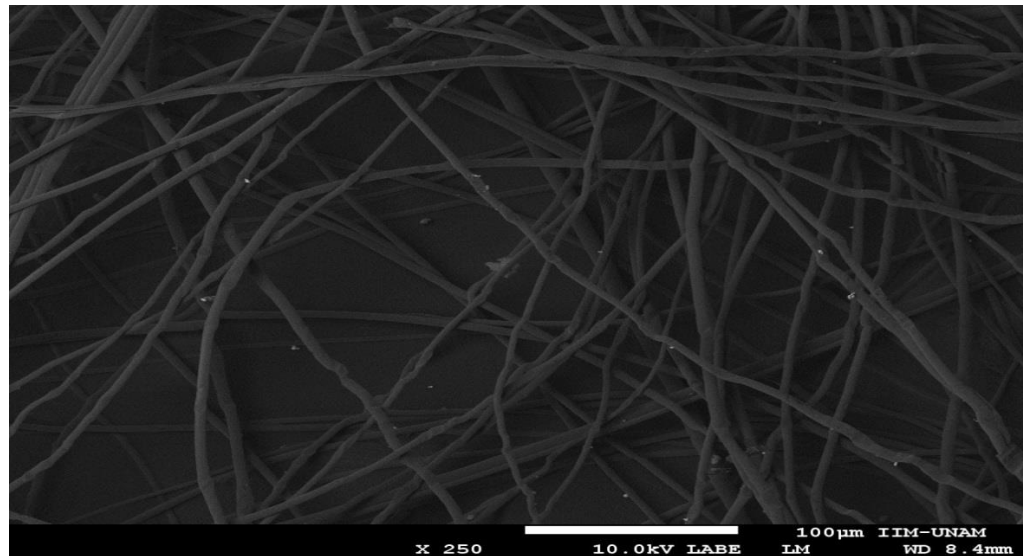
Figura 15. Fibras producidas en banco de pruebas



Fuente: Autores del Proyecto.

Algunos trozos de las fibras producidas fueron enviados al Instituto de investigaciones en Materiales-IIM de la UNAM en México, donde le fueron realizados análisis con equipos capaces de hacer caracterización por la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), obteniendo resultados como los mostrados en la figura 16, donde se evidencia la adecuada formación de membranas a una escala de  $100\mu\text{m}$ .

Figura 16. Análisis en SEM de fibras producidas



Fuente: Autores del Proyecto.

Con lo anterior se confirma la efectividad del elctrohilado por centrifugado y se establece para la implementación del equipo, la necesidad de controlar los siguientes parámetros:

*Velocidad de rotación*, debido a que una de las modificaciones más importante que se hace en esta nueva técnica con respecto a la técnica tradicional está relacionada con la forma de dosificar el material polimérico a electrohilar, se hace indispensable poder tener control de la velocidad rotacional y por tanto poder experimentar con los efectos de la fuerza centrífuga tanto en el proceso como en la calidad de las fibras.

*Nivel de Tensión*, desde luego que el campo eléctrico generado entre el dosificador y el colector requiere ser controlado, para ello el nivel de tensión proporcionado por la fuente de alto voltaje es uno de los parámetros que los investigadores usuarios del equipo deben poder manipular.

*Caudal de inyección de polímero*, existen varias razones por las cuales debe ser controlada la inyección de material; en primera instancia se pretende que haya una medida de la cantidad de material a electrohilar, también se requiere que la inyección de polímero se realice a velocidades establecidas y en el instante oportuno, puesto que una inyección adecuada debe hacerse luego de que el sistema de centrifugado haya alcanzado estabilidad en la velocidad deseada, lo cual resulta imposible de lograr si la inyección se hiciese de forma manual, cabe resaltar que una deposición de todo el material antes de arrancar el sistema de centrifugado provoca daños en las fibras debido al brusco cambio en las centrifugas, además se busca minimizar el contacto que el usuario deba tener con partes del equipo donde el campo eléctrico presente le pueda ocasionar algún accidente.

Existen otros parámetros que afectan directamente en la calidad de las fibras producidas, pero que no están relacionados con el proceso sino con la solución como lo son: viscosidad, concentración, tensión superficial, peso molecular, conductividad, y con las condiciones ambientales; y que por lo tanto no son condiciones de trabajo que el usuario pueda controlar desde el equipo, sino que requieren labores externas a fin de ampliar las posibilidades de experimentación.

Con el propósito de dar solución para el control de cada uno de los parámetros se definen las respectivas estrategias de control tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Definición de estrategias de control.

PARÁMETRO	ESTRATEGIA DE CONTROL
Nivel de Tensión	Control en lazo abierto
Velocidad de Centrifugado	Control en lazo cerrado tipo proporcional
Caudal de Inyección de Polímero	Control en lazo abierto

Fuente: Autores del Proyecto.

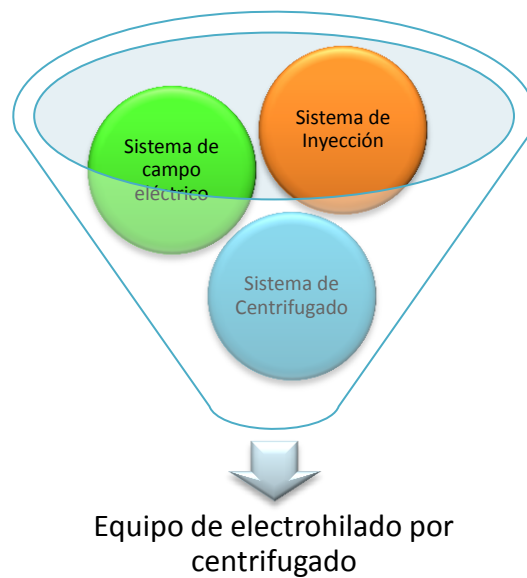
Para los parámetros nivel de tensión y caudal de inyección, se define hacer un control en lazo abierto pues se considera que son variables que una vez fijadas por el usuario no están propensas a presentar alteraciones debido a que en el proceso no existe ningún tipo de perturbación interna ni externa que lo provoque, es por esto que no es necesario implementar ningún sistema de realimentación, es decir no se mide la salida ni se compara con la entrada; la precisión de estos parámetros depende de un adecuado proceso de calibración.

Puesto que la velocidad de rotación es un parámetro en el que presentan alteraciones de la salida con respecto a la entrada, es necesario implementar una estrategia de control en lazo cerrado empleando como sensor de velocidad un encoder de tipo incremental, el cual proporciona una medida de la velocidad del motor cuyo valor es comparado con el valor establecido en la entrada por el usuario del equipo. Debido a las condiciones del sistema en el cual se presenta una diferencia o error entre la entrada y la salida, y teniendo en cuenta que durante el proceso no se prevén perturbaciones internas ni externas que puedan originar cambios bruscos en el valor de salida y por lo tanto en el error, la acción de control empleada es de tipo proporcional.

#### 4. DISEÑO DEL SISTEMA

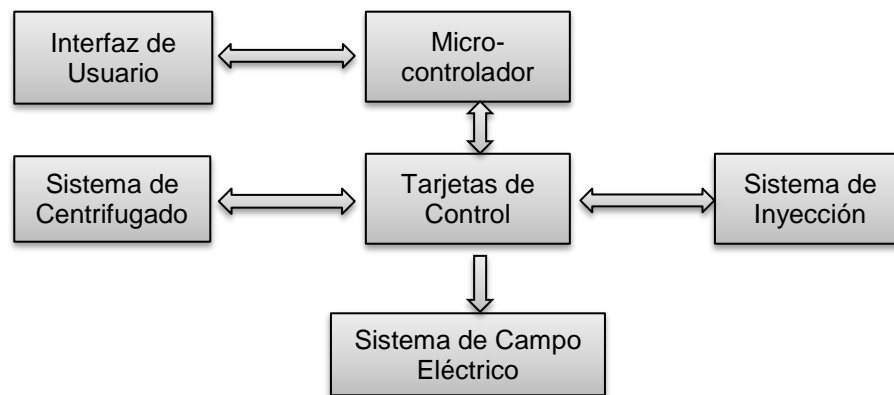
Según los resultados obtenidos en la definición de parámetros y determinación de estrategias de control, el equipo requiere de tres sistemas como se muestra en la figura 17, controlados a través de tarjetas electrónicas de control, las cuales reciben y envían instrucciones al microcontrolador, a su vez éste también interactúa con la interfaz de usuario intercambiando información, tal como se ilustra en el esquema de la figura 18.

Figura 17. Sistemas que componen el equipo de electrohilado por centrifugado.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 18. Esquema de integración del sistema de control

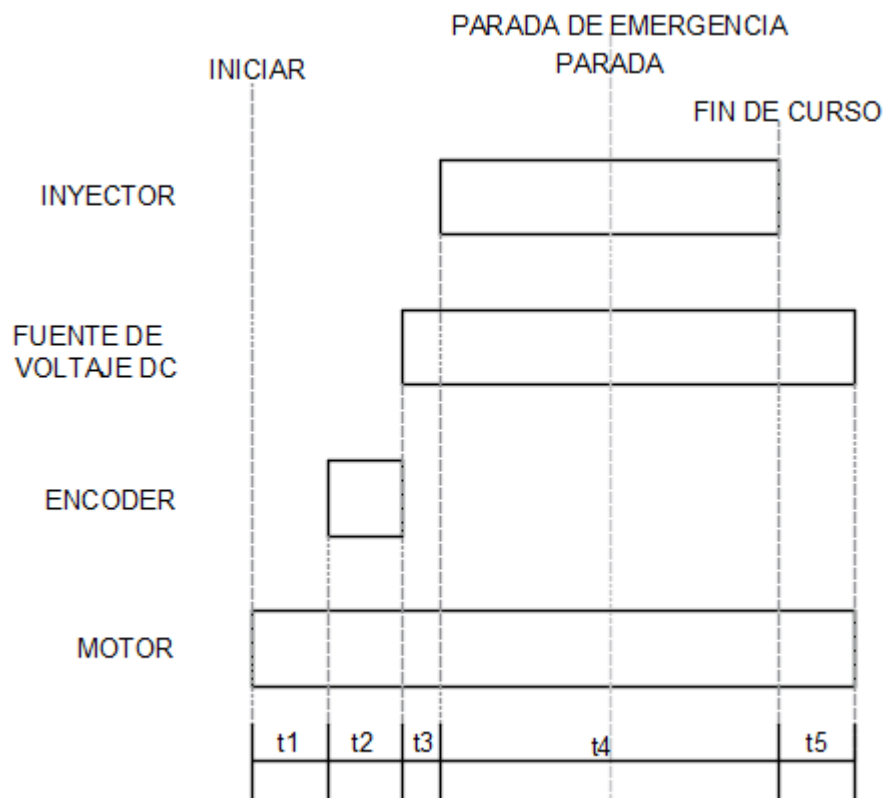


Fuente: Autores del proyecto.

#### 4.1 DIAGRAMA DE PROCESO

El equipo de electrohilado por centrifugado, además de tener un control en los valores de los parámetros del proceso, también requiere de la implementación de una rigurosa secuencia de actuación de cada uno de los sistemas que lo componen y de la definición de tiempos apropiados, para conseguir el óptimo funcionamiento de éste, así como la calidad del proceso y por tanto de las fibras producidas. En la figura 19 se observa el diagrama de proceso diseñado para su implementación en el equipo.

Figura 19. Diagrama de proceso.



Fuente: Autores del proyecto.

Según éste diagrama, en el momento en que el usuario del equipo a través de la interfaz, de la orden de inicio del proceso arranca el motor DC y transcurrido un tiempo t1 en el cual el motor se ha estabilizado en un valor cercano a la velocidad objetivo, un encoder dispuesto en el eje del motor toma lecturas las cuales se procesan digitalmente para hacer la comparación y corregir el error a través de un

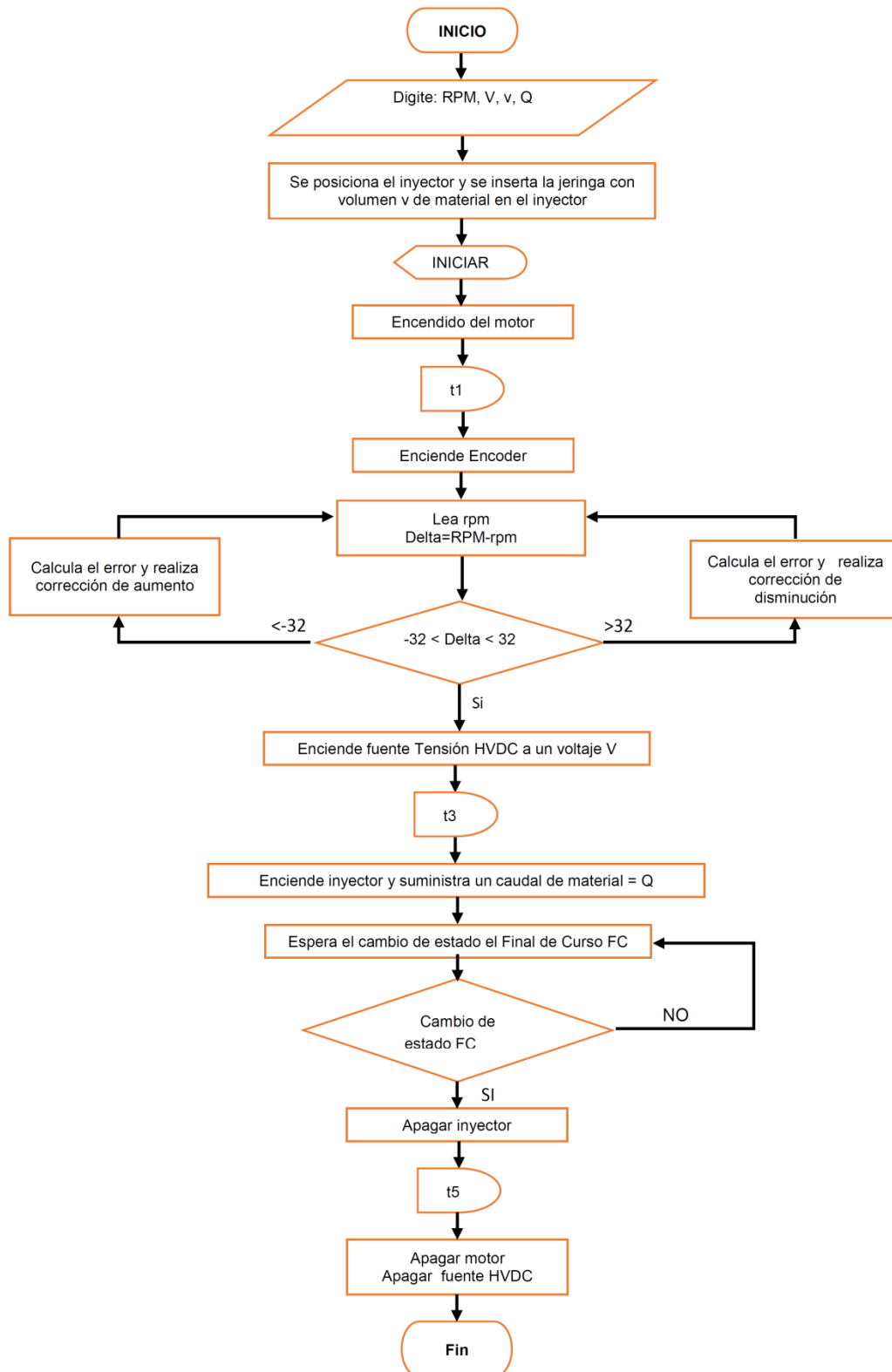
control proporcional, esto tarda un tiempo  $t_2$  el cual depende de la rapidez con que la velocidad medida se aproxime a la velocidad objetivo, transcurrido lo anterior se enciende la fuente de Alto Voltaje DC (HVDC) del sistema de campo eléctrico llevándola a un valor de tensión pre-establecido, transcurrido un tiempo  $t_3$  el sistema de inyección comienza el avance y se da por iniciado el proceso de electrohilado.

Cuando el sistema de inyección haya depositado todo el material polimérico y por tanto haya transcurrido el tiempo  $t_4$  el cual depende del caudal de inyección establecido por el usuario, se activa un sensor fin de curso dispuesto en el equipo de inyección y con ello se apaga el sistema de inyección, luego de un tiempo  $t_5$  se apagan en el mismo instante tanto la fuente de Alto Voltaje DC (HVDC) como el sistema de centrifugado, de ésta forma termina el proceso de electrohilado. Cabe mencionar que, en cualquier momento del proceso, si se activa el botón de parada o el pulsador de parada de emergencia el proceso se detiene, de igual manera si existiese una falla, la protección actúa y se desenergiza el equipo por completo.

## **4.2 DIAGRAMA DE FLUJO**

En el esquema mostrado a continuación se puede apreciar un flujograma general del funcionamiento del equipo, y de cómo debe estar programado para garantizar una buena respuesta de cada uno de los sistemas que lo componen, con el objetivo de tener un equipo en pleno funcionamiento, que supla las necesidades de los investigadores brindando una dinámica de experimentación a través de la variación de parámetros.

Con el objeto de complementar, dar claridad y poder analizar de forma más detallada el funcionamiento del equipo se desarrolla un diagrama de flujo completo, ver Anexo A.





Para llevar a cabo el sistema de control automático de cada uno de los parámetros definidos anteriormente con interacción desde una interfaz de usuario a través de un módulo LCD de pantalla táctil TFT, se selecciona el software de programación de Arduino, con una tarjeta controladora Arduino Mega 2560 R3 como la mostrada en la figura 20, la cual posee un microcontrolador Atmega2560, tiene 54 pines de entradas o salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas análogas, cristal oscilador de 16 MHz, 256kB de memoria flash, conexión USB y es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino.

Arduino fue seleccionado principalmente por ser un software de uso libre, por lo cual su utilización no requiere ningún costo, adicionalmente la placa es una sencilla plataforma física computacional que posee las características suficientes para el desarrollo del nuestro sistema de control y permite el desarrollo de objetos interactivos autónomos como el que se desea construir.

Figura 20. Tarjeta Arduino Mega 2560 R3.



Fuente: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>

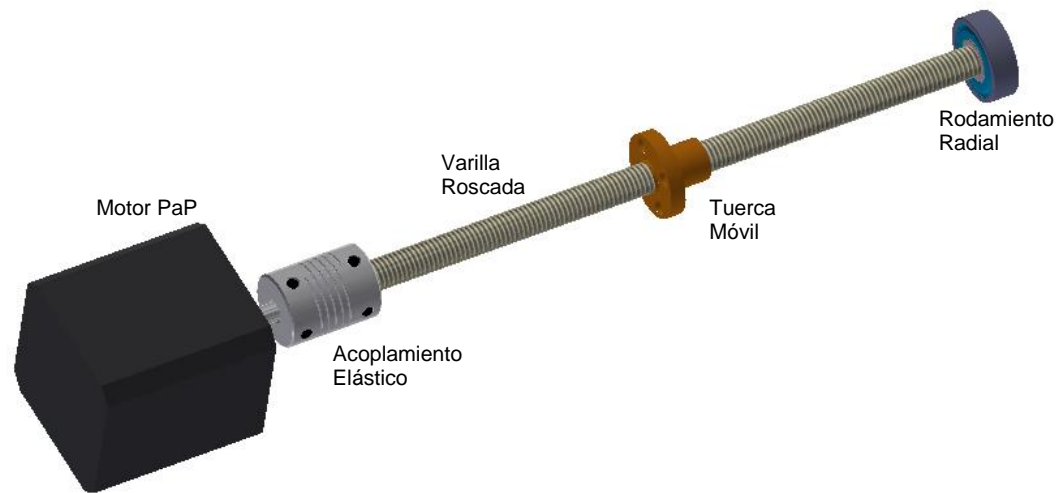
## **4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN**

### **4.3.1 Modelado CAD del equipo de inyección**

Con el uso del software Autodesk Inventor Profesional 2016, del cual se cuenta con una licencia estudiantil, se llevó a cabo el modelamiento CAD (diseño asistido por computadora) de cada una de las piezas y componentes del equipo de inyección a construir; las figuras 21 y 22 se muestran algunos de los subconjuntos modelados, y en la figura 23 se observa el respectivo ensamble total del equipo de inyección, ver Anexo B.

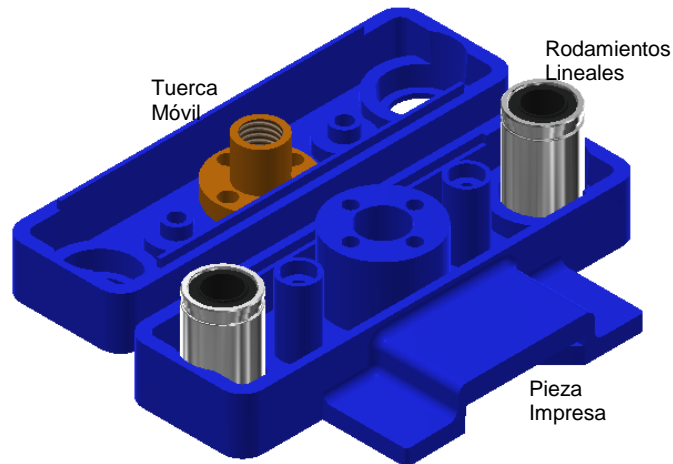
Inventor Profesional 3D CAD es un software que ofrece una configuración que facilita el uso de herramientas para el diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos, ayudando a diseñar y validar los productos antes de que se construyan ofreciendo mejores productos más rápido<sup>15</sup>.

Figura 21. Modelado conjunto de transmisión de movimiento.



Fuente: Autores del Proyecto.

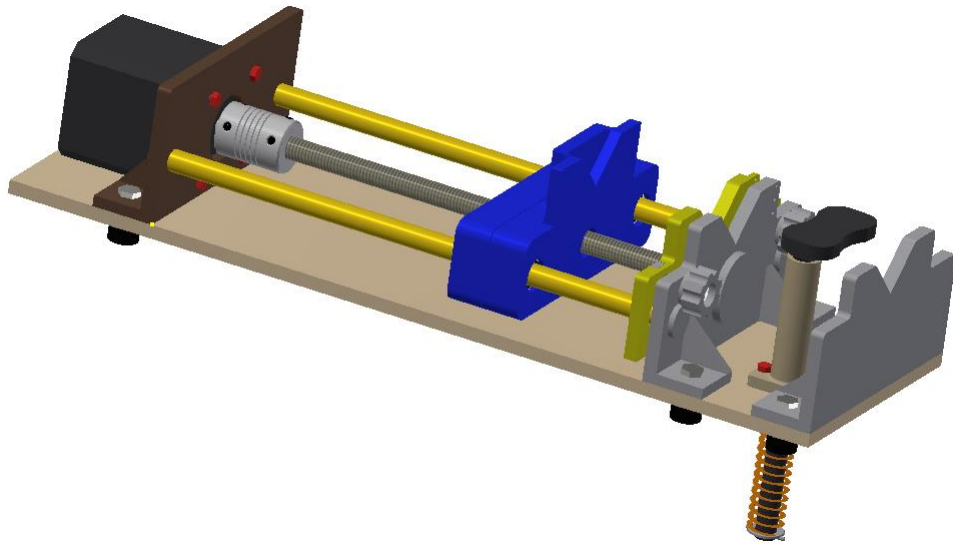
Figura 22. Modelado carro de inyección.



Fuente: Autores del Proyecto.

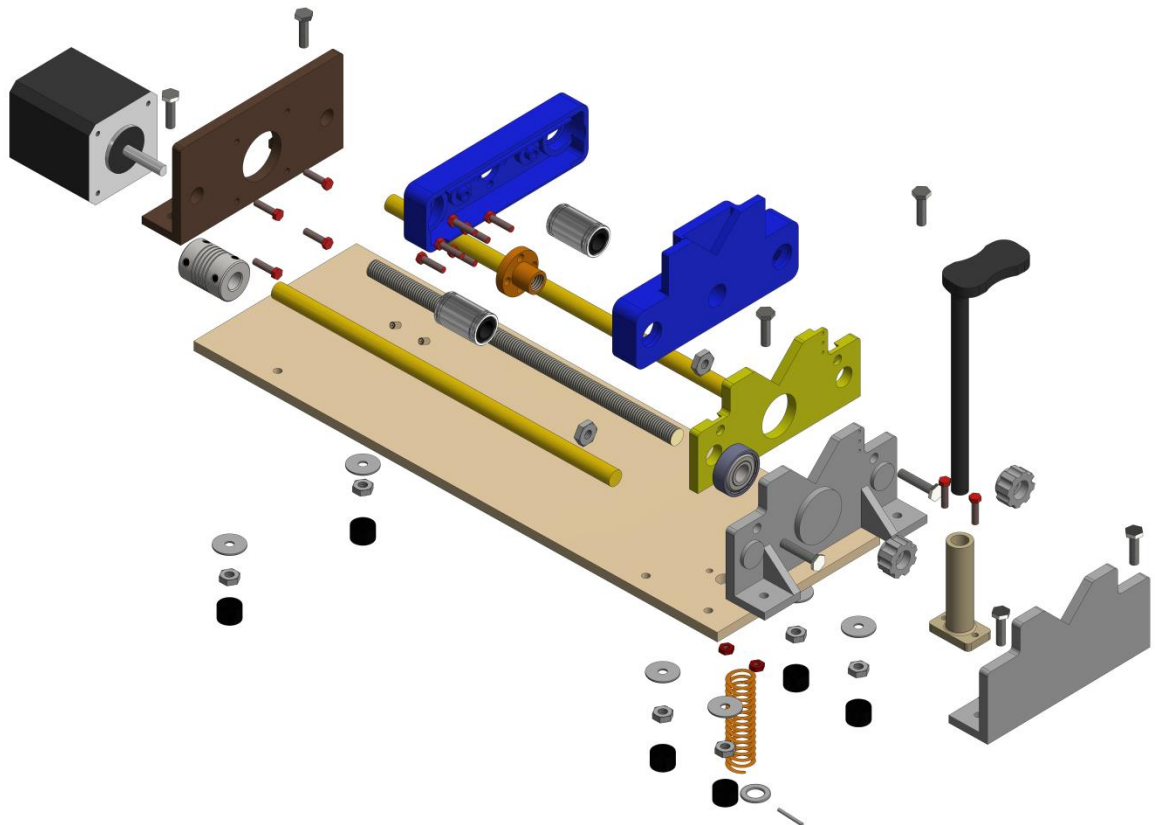
<sup>15</sup>AUTODESK INVENTOR / Modelamiento 3D CAD, [en línea] Disponible en: <http://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>

Figura 23. Modelo CAD del inyector con Autodesk Inventor.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 24. Explosionado del inyector.



Fuente: Autores del Proyecto.

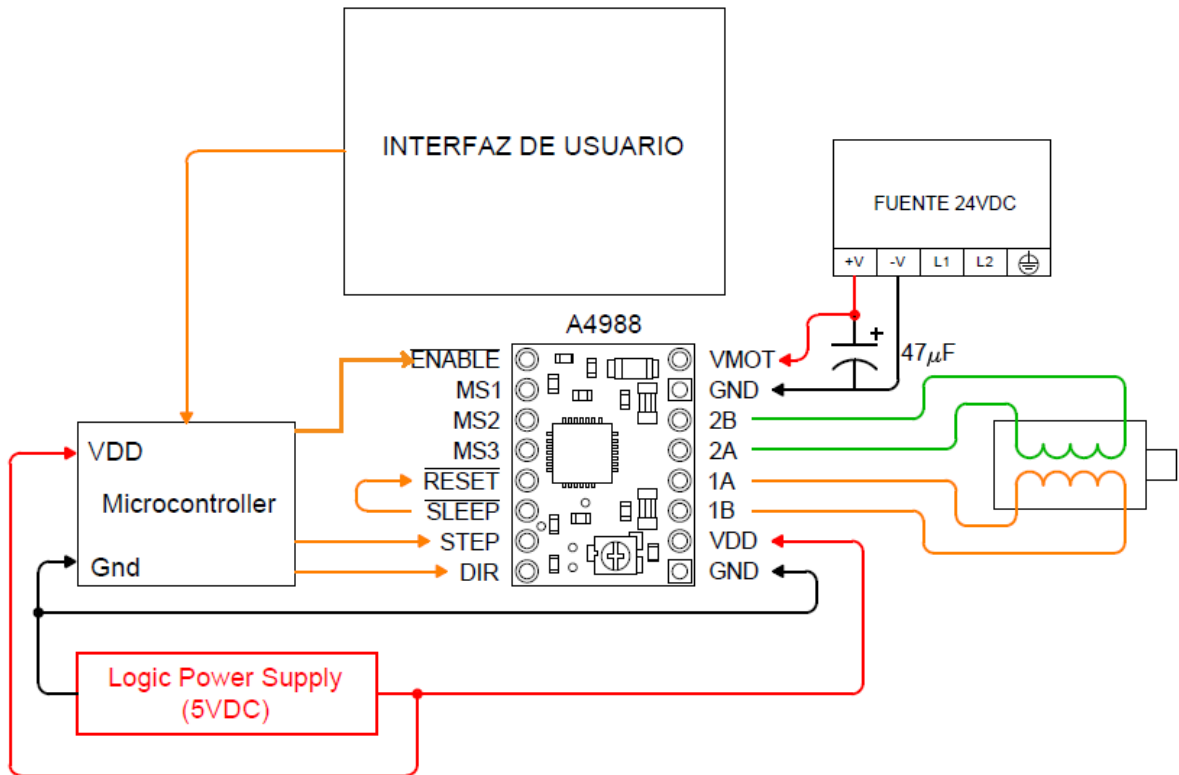
### **4.3.2 Diseño del sistema de control de inyección.**

#### **4.3.2.1 Determinación de la estrategia de control**

Para el control del sistema de inyección la estrategia consiste en manipular el motor paso a paso tanto en el número de pasos estableciendo posición, como en el tiempo que demora en dar cada paso controlando así su velocidad; el movimiento rotacional generado en el eje del motor es transmitido con una relación de transmisión 1 a 1 a un tornillo roscado, sobre el cual se desplaza una turca viajera con características de rosca apropiadas para éste tornillo, la cual se encuentra acoplada al carro inyector, pieza en la que se incrusta el aleta de la jeringa y que se desplaza además sobre un par de guías con un respectivo par de rodamientos lineales contenidos en ella; convirtiendo así el movimiento rotacional en movimiento lineal, para así lograr el desplazamiento del pistón de la jeringa inyectando el material polimérico disuelto.

La programación hecha y cargada en la tarjeta Arduino Mega 2560 R3 debe garantizar que en función de la cantidad de material a inyectar definida por el usuario, el motor debe efectuar un determinado número de pasos y por lo tanto el carro inyector se debe desplazar hasta la posición adecuada para que la jeringa con el material cargado encaje perfectamente. En función del caudal o velocidad de inyección definida por el usuario, una vez se dé inicio al proceso de electrohilado el motor paso a paso debe girar tardando un determinado tiempo por cada paso. En la figura 25 se muestra un esquema del circuito de control diseñado para el sistema de inyección, empleando un driver para motores paso a paso.

Figura 25. Esquema del circuito de control del sistema de inyección.



Fuente: Autores del Proyecto.

#### 4.3.2.2 Modelamiento matemático del sistema de inyección

Para el modelamiento matemático se deben tener las siguientes consideraciones:

- **Motor paso a paso:**

$N$  = Número de Pasos por vuelta [pasos/vuelta]

$p$  = Avance en pasos del motor [pasos]

$\frac{dp}{dt}$  = Pasos por unidad de tiempo [pasos/s]

$T_R$  = Torque del motor paso a paso [kg-cm]

- **Driver para motor paso a paso:**

$f_p$  = Fracción de paso

- **Transmisión de movimiento del motor al husillo:**

$R$  = velocidad angular del motor / velocidad angular del husillo.

- **Avance lineal del husillo por vuelta (paso del husillo):**

$l = \text{Paso del husillo [mm/vuelta]}$

- **Tamaño de la jeringa a utilizar:**

$A = \text{Área transversal de la jeringa [mm}^2\text{]}$

$D = \text{Diámetro interno de la jeringa [mm]}$

- **Caudal a suministrar**

$Q = \text{Caudal [ml/min]}$

$k = \text{Constante de transformación de ml/min a mm}^3\text{/s}$

### **Posición:**

La ecuación 1 define la posición del “carro” en función de algunos parámetros de transmisión de movimiento y características del motor paso a paso a usar.

$$x = \frac{l f_p}{NR} * p \quad [mm] \quad \text{Ec. 1}$$

$$x * A = \frac{l f_p}{NR} * p * A \quad \text{Ec. 2}$$

Despejando de la ecuación 1 se encuentra una expresión que define el número de pasos o  $\mu$ pasos.

$$p = \frac{1000 V N R}{l f_p A} \quad [pasos \text{ o } \mu pasos] \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo:

$V = \text{Volumen de material a inyectar [ml]}$

$N = 200 \text{ Pasos}$

$R = 1$

$l = 8 \text{ [mm/vuelta]}$

$$f_p = 1/16$$

$$D = 19,1 \text{ [mm]}$$

$$A = \frac{\pi * (D^2)}{4} \text{ [mm}^2\text{]} = \frac{\pi * (19,1^2)}{4} \text{ [mm}^2\text{]} = 286,5 \text{ [mm}^2\text{]} \quad \text{Ec. 4}$$

Remplazando en la ecuación 3, se encuentra la expresión que define el número de pasos en función del volumen a inyectar definido por el usuario del equipo.

$$p = 1396,05 * V \text{ [pasos o } \mu\text{pasos]} \quad \text{Ec. 5}$$

### **Velocidad:**

Considerando movimiento uniforme:

$$v = k \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{l f_p}{NR} * \frac{dp}{dt} = k \frac{Q}{A} \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

$$dt = \frac{l f_p}{NR} * \frac{A}{k Q} * dp \quad \text{Ec. 8}$$

$$\int_0^t dt = \frac{l f_p}{NR} * \frac{A}{k Q} \int_0^p dp \quad \text{Ec. 9}$$

Remplazando la ecuación 6 en función de la posición, luego integrando y despejando t se tiene:

$$t = \frac{l f_p}{NR} * \frac{A}{k Q} * p * 1000 \text{ [}\mu\text{s]} \quad \text{Ec. 10}$$

Definiéndose como valores fijos  $k = \frac{1}{60}$  y  $p = 1$

Y conectando el driver para motor paso a paso de la tal manera que  $f_p = 1/16$ , se encuentra una expresión que define el tiempo que debe tardar el motor por cada paso, en función del caudal de inyección de material que el usuario del equipo desee.

$$t = \frac{42978,17}{Q} [\mu s] \quad Ec. 11$$

La ecuación anterior junto con la ecuación 5 se convierte en las herramientas clave para el desarrollo de la programación correspondiente al sistema de inyección.

La tabla 3 hace referencia a los cálculos correspondientes al sistema de inyección, ver Anexo C, mostrando diferentes valores de tiempos y número de pasos en función de valores de caudal y volumen respectivamente, los cuales son establecidos por el usuario.

Tabla 3. Cálculos para el sistema de inyección.

Q [mL/min]	t [ $\mu s$ ]	V[mL]	Núm. de pasos
1	42978	1	1396
2	21489	2	2792
3	14326	3	4188
4	10745	4	5584
5	8596	5	6980
6	7163	6	8376
7	6140	7	9772
8	5372	8	11168
9	4775	9	12565
10	4298	10	13961
11	3907	11	15357
12	3582	12	16753
13	3306	13	18149
14	3070	14	19545



Tabla 3. Continuación.

<b>Q [mL/min]</b>	<b>t [μs]</b>	<b>V[mL]</b>	<b>Núm. de pasos</b>
15	2865	15	20941
16	2686	16	22337
17	2528	17	23733
18	2388	18	25129
19	2262	19	26525
20	2149	20	27921

Fuente: Autores del Proyecto.

#### 4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CENTRIFUGADO

Para el sistema de centrifugado fue seleccionado un motor DC de imán permanente con fuente y variador de velocidad, un encoder óptico con un disco de 360 ranuras. Para efectos de medición se decide construir un nuevo disco para el encoder con una sola ranura debido a la frecuencia a la cual puede tomar los datos la tarjeta de adquisición de datos, ya construido el disco se acopla al eje del motor, se realiza el montaje del motor en un soporte y del sensor óptico del encoder, se verificó que no existiera fricción entre el sensor óptico y el disco. Se realizó la conexión del motor con el variador de velocidad, se a hacer la conexión del sensor óptico con el controlador y se realiza la programación en arduino tomando el periodo de una revolución y posteriormente convirtiéndola en rpm, hecho esto se realizaron las pruebas de funcionamiento tomando lectura de la velocidad del motor con el encoder y comparándolas con las obtenidas por un tacómetro digital, a distintas velocidades cuya variación de velocidad se realiza de forma manual con un potenciómetro análogo. Mediante estas pruebas se observa que la velocidad mínima del motor es de 177 rpm y la máxima de 7000 rpm.

Con el objetivo de lograr el pleno funcionamiento del sistema fue necesario del diseño de una pieza soporte del motor DC por no encontrarse en óptimas condiciones para el buen funcionamiento de éste, el modelado CAD de ésta pieza se muestra en la figura 26 junto con otras piezas diseñadas como lo son el disco de 1 ranura, un soporte para el encoder y una pieza para la protección del mismo, ver Anexo D.

Figura 26. Modelado CAD de piezas fabricadas para el sistema de centrifugado



Fuente: Autores del Proyecto.

En la figura 27 se observa el renderizado del dosificador diseñado, cuyo plano se encuentra en el Anexo E, construido con un material conductor eléctrico que conecte la terminal positiva de la fuente de Alto Voltaje DC por medio de un sistema de escobillas, dicho dosificador va acoplado al eje del motor DC, para que por la fuerza centrífuga se dosifique la solución. Cabe mencionar que, en el proceso éste dispositivo abastece continuamente de material polimérico con ayuda del sistema de inyección.

Figura 27. Imagen renderizada del dosificador



Fuente: Autores del Proyecto.

#### 4.4.1 Diseño del sistema de control de velocidad de centrifugado

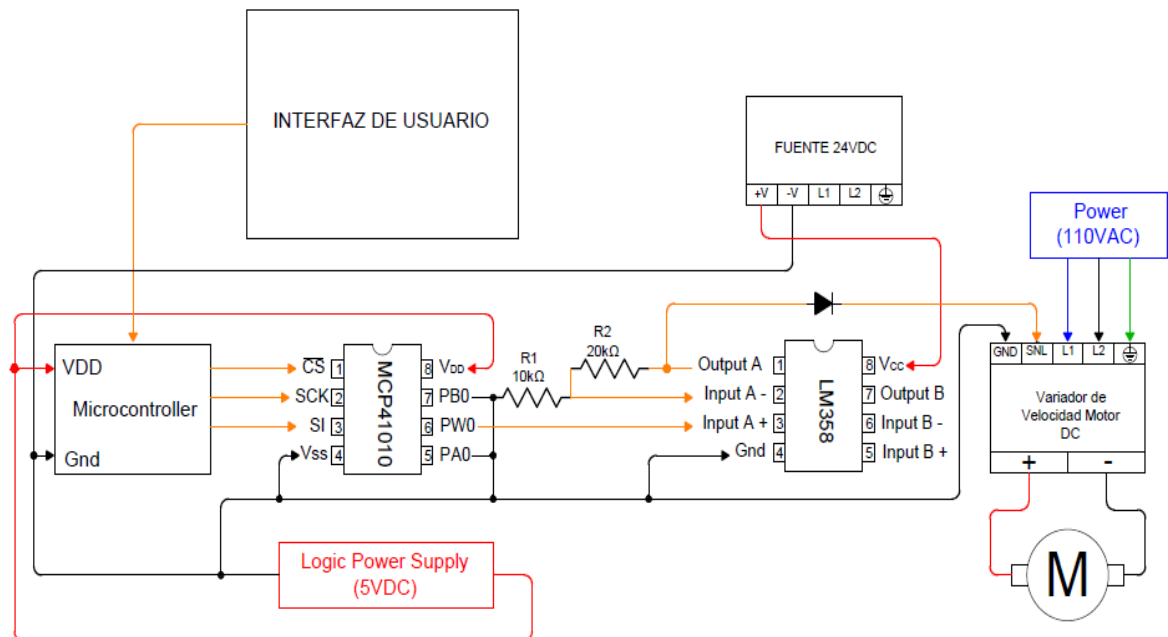
Para realizar el control de velocidad automático, se usa un potenciómetro digital de 256 taps por la resolución y opciones de velocidad que puede ofrecer, y un control proporcional debido a que la variación de la carga es insignificante durante el proceso para la potencia del motor.

Se implementa un arranque suave a aproximadamente 500 rpm para después ser llevado el motor a la velocidad objetivo, se espera un tiempo en que se estabilice el motor y se inicia a ejecutar el control proporcional tomando la lectura de la velocidad por medio del encoder y comparándola con la velocidad objetivo.

El rango de velocidad de centrifugado será de 1000 rpm hasta 6900 rpm, con una resolución de 100 rpm dando lugar a 59 opciones de velocidad con las que contará el equipo.

En la figura 28 se muestra un esquema del circuito de control diseñado para el sistema de centrifugado, en éste se evidencia el uso de un potenciómetro digital además de un circuito de amplificación de tensión que lo eleve al nivel requerido por el variador de velocidad.

Figura 28. Esquema del circuito de control del sistema de centrifugado.



Fuente: Autores del Proyecto.

#### 4.4.2 Curva de comportamiento del sistema de centrifugado

Para el diseño del sistema se construyó la curva mostrada en la figura 29, en la cual se compara el número de pasos del potenciómetro digital versus la velocidad rotacional del motor, esto con el fin de poder programar los pasos del potenciómetro en función de la velocidad, en éste trabajo se obtienen los datos consignados en la tabla 4.

Tabla 4. Datos de calibración del sistema de centrifugado.

<b>Taps</b>	<b>rpm medidas</b>
58	1530
74	1930
90	2343
106	2730
122	3138
138	3564
153	4004
169	4422
185	4914
201	5332
217	5780

Fuente: Autores del proyecto.

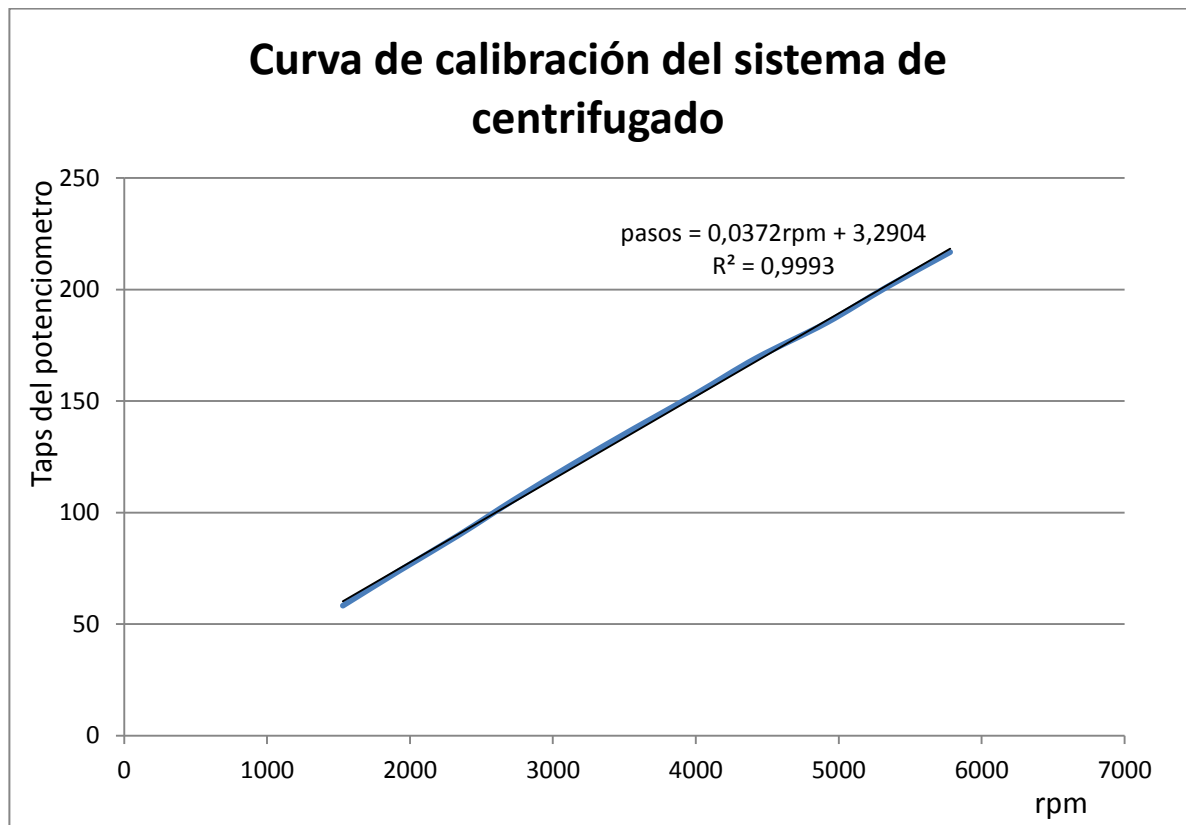
Realizando una regresión lineal a la curva construida se obtiene la ecuación 12, con la cual se programa el control automático de velocidad.

$$\text{pasos} = 0,0372(\text{rpm}) + 3,2904$$

*Ec. 12*

La curva obtenida presenta un comportamiento con tendencia lineal, donde el número de pasos o taps en el potenciómetro digital, es decir, lo que define la potencia a entregarse al motor, es directamente proporcional a la velocidad rotacional en rpm del eje del motor DC al cual se acopla el dosificador.

Figura 29. Curva de calibración del sistema de centrifugado.



Fuente: Autores del proyecto.

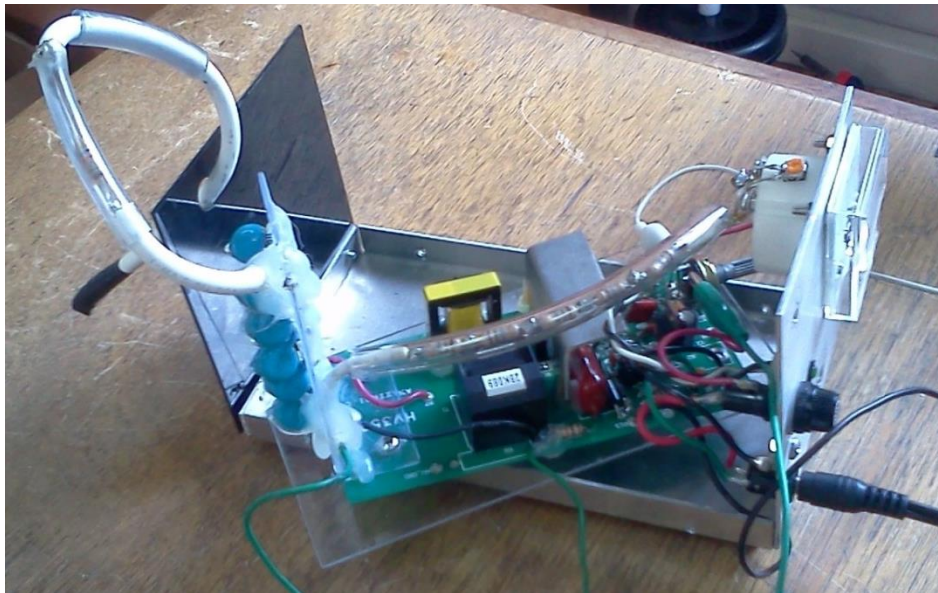
#### 4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO

Para la construcción del equipo se cuenta con una fuente de voltaje DC variable mostrada en la figura 30, la cual a partir de su encendido suministra entre 5 y 25 kV, dicha fuente realiza la variación del nivel de tensión manipulando la frecuencia de operación, es por esto que consiste en un equipo muy sencillo, pequeño y versátil que fácilmente puede ser incorporado en el equipo de electrohilado generando el campo eléctrico necesario para la polarización del polímero disuelto.

La variación del nivel de tensión en la fuente DC adquirida, se hace manualmente por medio de un potenciómetro análogo tal como se muestra en la figura 31, dicho sistema debe ser cambiado o modificado con el fin de lograr tener un control digital y además automático.

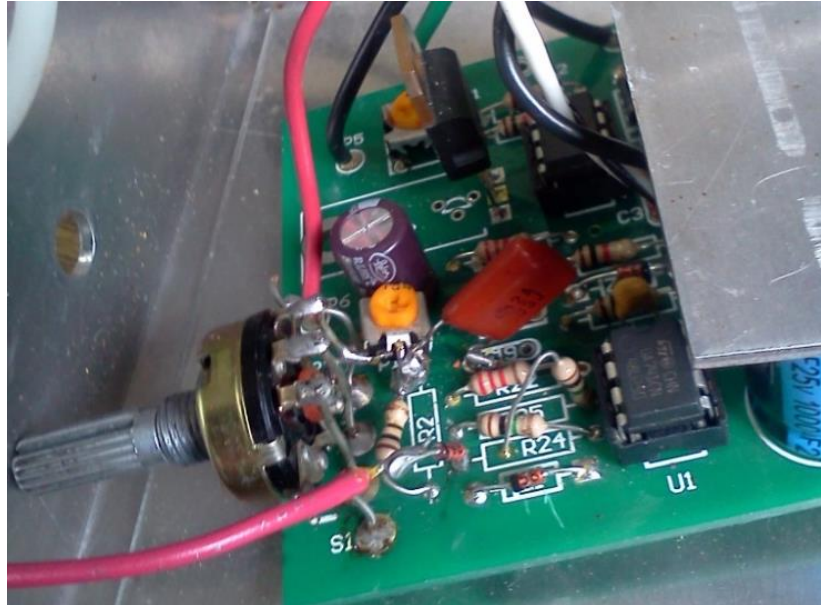
Para realizar las pruebas de funcionamiento de la fuente y la verificación del rango de tensión que suministra, se cuenta con una punta de medición la cual reduce el valor de tensión de 1000 a 1 v, para de ésta forma poder realizar la medida con un multímetro común.

Figura 30. Fuente de voltaje DC



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 31. Mecanismo inicial de variación de tensión.



Fuente: Autores del proyecto.

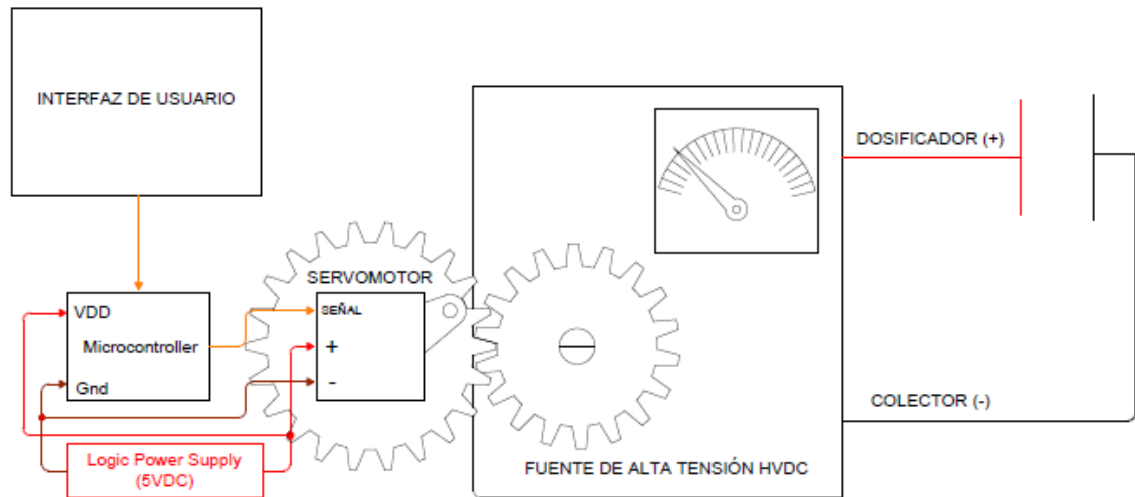
#### 4.5.1 Determinación de la estrategia de control

Para el control del sistema de campo eléctrico, y teniendo en cuenta el mecanismo de variación con el que cuenta la fuente, se establece hacer la manipulación de forma externa con el propósito de no intervenir en el sistema electrónico interno, evitando la ocurrencia de algún accidente o el daño del equipo debido a las grandes diferencias de tensión presentes.

Con base en lo anterior, se prevé el montaje de un par de engranajes con una relación de transmisión de 1,5 acoplados cada uno al potenciómetro análogo de la fuente de tensión, y al eje de un servomotor respectivamente.

Un servomotor ubica la posición del potenciómetro dentro de un rango de operación de 0 a 180° y mantiene estable dicha posición; un tren de engranajes que se encarga de reducir la velocidad de giro del motor y aumentar el torque. En la figura 32 se muestra un esquema del circuito de control diseñado para el sistema de campo eléctrico.

Figura 32. Esquema del circuito de control del sistema de campo eléctrico.



Fuente: Autores del proyecto.

#### 4.5.2 Curva de comportamiento del sistema de campo eléctrico

Los resultados obtenidos del comportamiento del sistema se muestran en la tabla 5, los cuales son graficados punto a punto construyendo la curva de voltaje que se observa en la figura 33, en ésta también se ilustra una curva de tendencia muy aproximada que muestra la variación del voltaje en función de la posición del servomotor, para la cual se encuentra una expresión matemática polinómica de tercer orden que la define.

Tabla 5. Resultados proceso de calibración del sistema de campo eléctrico.

Grados	V
150	5880
140	5950
130	5960
120	6630
110	7310
100	8040

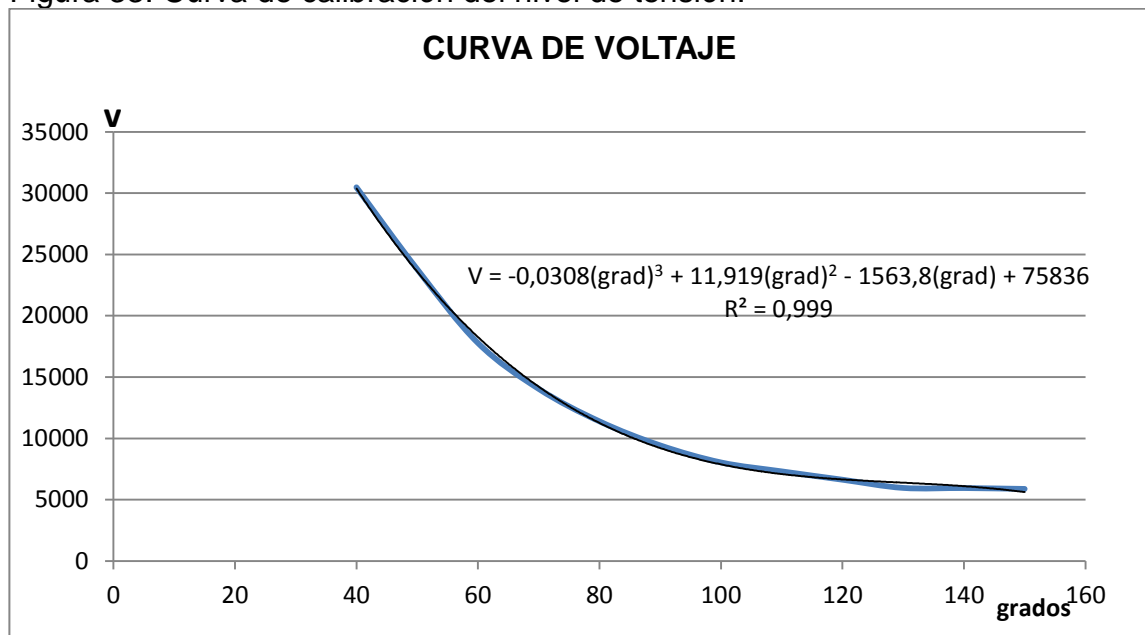


Tabla 5. Continuación.

Grados	V
90	9430
80	11390
70	14040
60	17780
50	23800
40	30480

Fuente: Autores del proyecto.

Figura 33. Curva de calibración del nivel de tensión.



Fuente: Autores del proyecto.

La curva obtenida tiene una forma polinómica, en la que el valor de tensión suministrado por la fuente de alta tensión DC es inversamente proporcional al número de grados que el eje del servomotor efectúe en su giro.

$$V = -0,0308(\text{grad})^3 + 11,92(\text{grad})^2 - 1563(\text{grad}) + 75836$$

*Ec. 13*

La ecuación 13 define la curva de calibración de tensión, y se convierte en una herramienta primordial para el desarrollo de la programación del sistema de

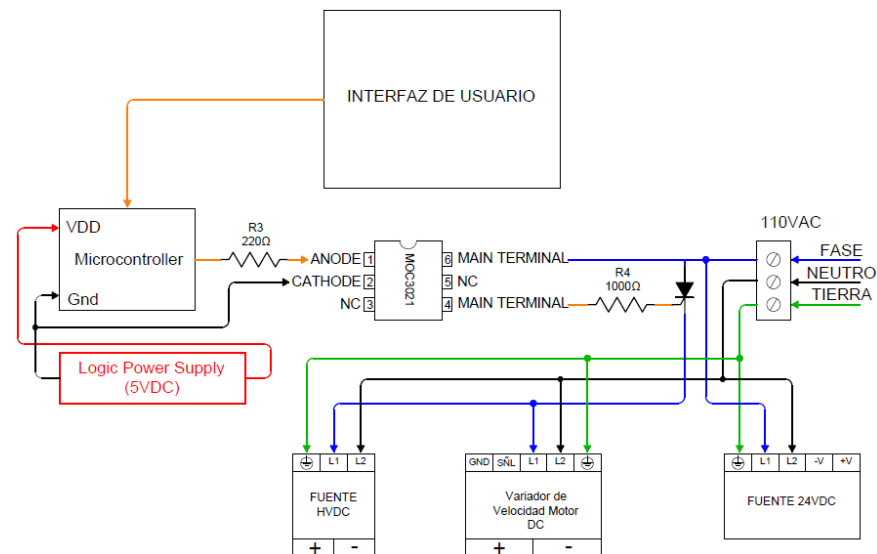
campo eléctrico, en el trabajo de calibración realizado también fueron tomados los datos de corriente y construida su respectiva curva de tendencia, ver Anexo F.

#### 4.6 DISEÑO DEL CIRCUITO DE ENERGIZACIÓN DE COMPONENTES AC

Es diseñado un circuito opto acoplado encargado del control ON/OFF del sistema, éste se compone principalmente por un MOC 3011, un Triac BTA20 de 20 A. Hace parte de la tarjeta de control principal, de ésta forma se conecta directamente con el microcontrolador, además posee una serie de borneras como salidas hacia la fuente de Alto Voltaje DC, la fuente de 24V DC y el motor DC a través del variador de velocidad.

En este circuito diseñado, cuyo esquema se muestra en la figura 34, dada la instrucción desde la interfaz de usuario, la tarjeta microcontroladora transmite una señal provocando que en el circuito integrado de optoacople el led emita y active el diac permitiendo el paso de corriente para la compuerta del Triac, y así permita el flujo de corriente hacia la carga, la cual en éste caso son los componentes AC de nuestro equipo de electrohilado por centrifugado.

Figura 34. Esquema del circuito de energización de componentes AC.



Fuente: Autores del proyecto.

El esquema del circuito de control de todo el equipo de electrohilado por centrifugado, se puede apreciar en el Anexo G.

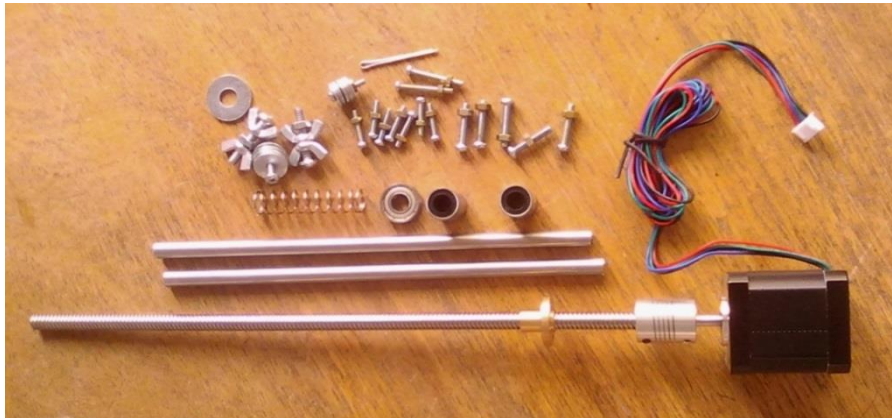
## 5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

### 5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

#### 5.1.1 Construcción del equipo de inyección

En el mercado nacional fueron adquiridos algunos de los componentes del equipo de inyección, como lo son: motor paso a paso, acople flexible, varilla roscada, tuerca móvil, varillas lisas, resorte, rodamientos y tornillería, los cuales se observan en la figura 35, cumpliendo con las especificaciones establecidas en el modelo previamente diseñado.

Figura 35. Componentes adquiridos para el sistema de inyección.



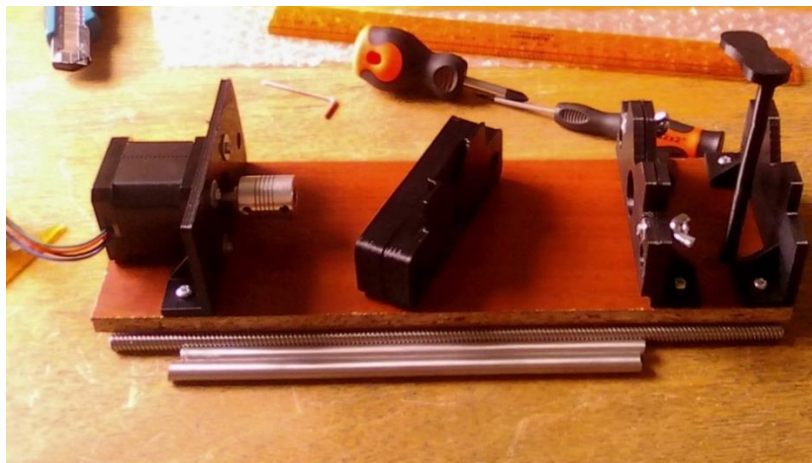
Fuente: Autores del Proyecto.

Empleando el proceso de impresión 3D fueron fabricadas otras piezas necesarias para la construcción del sistema, éstas fueron modeladas, exportadas a formato tipo STL (Estereolitografía) y finalmente impresas, lo anterior gracias al apoyo del grupo de investigación en energías y nuevas tecnologías GENTE quienes cuentan con equipos de impresión 3D tipo delta que desarrollan este tipo de procesos, las piezas fueron impresas en ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).

Una vez adquiridos o fabricados todos los componentes del sistema de inyección y de hacer una estricta revisión de sus dimensiones se realiza el respectivo ensamble como se observa en la figura 36, en la figura 37 se muestra el equipo inyector totalmente construido.

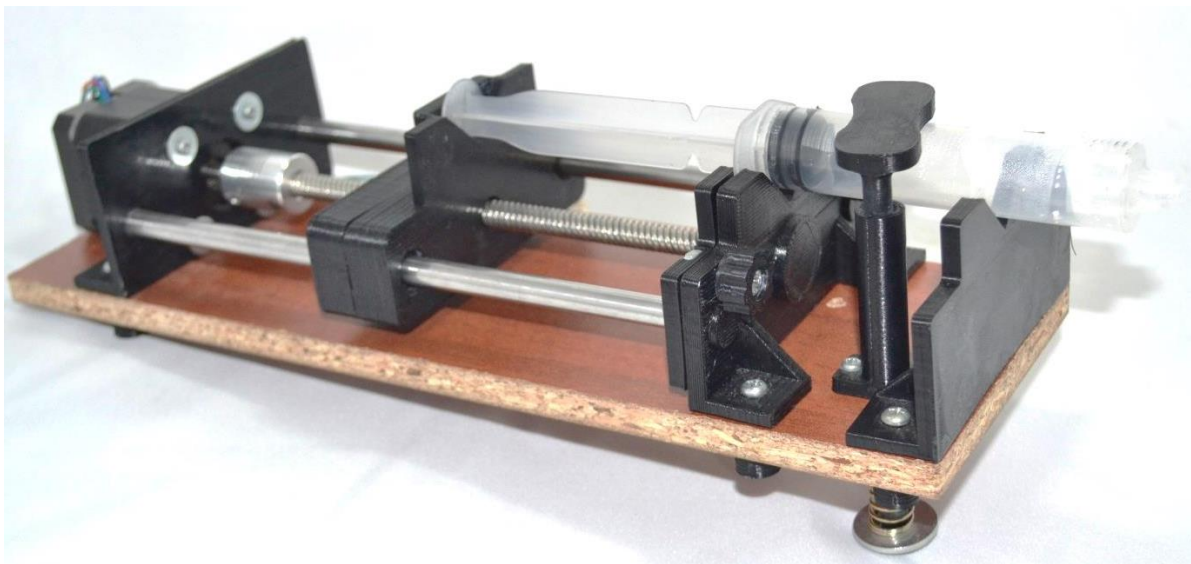
En el Anexo H, se pueden apreciar el plano de diseño de las partes del equipo de inyección construido.

Figura 36. Ensamble del Inyector.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 37. Inyector construido.



Fuente: Autores del Proyecto.

Las características de los componentes del sistema de inyección se muestran en la respectiva ficha técnica, ver Anexo I.

### 5.1.2 Implementación del sistema de control del inyector

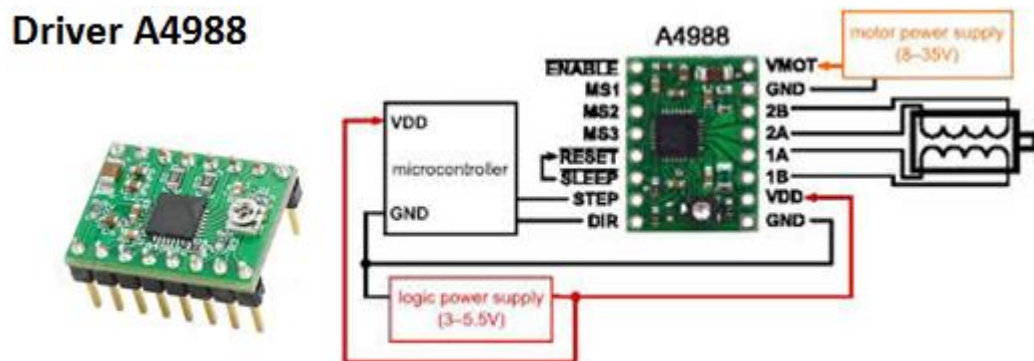
Se emplea un driver para motores paso a paso A4988 cuyo esquema de conexión se observa en la figura 38, el cual proporciona los siguientes beneficios para el sistema de control del inyector:

Permite fraccionar los pasos del motor hasta un dieciseisavo, para el caso se tiene un motor que a full paso es de 200 pasos por cada vuelta, pero que con el driver se puede llevar hasta 3200  $\mu$ pasos por cada vuelta, con esto se consigue que el movimiento sea mucho más suave, logrando una inyección más constante, disminución de vibraciones y de ruido.

Posee un potenciómetro análogo con el cual se puede variar el nivel de corriente que el driver permite pasar hacia las bobinas del motor, evitando el paso de corrientes muy altas que puedan dañar el motor, ésta calibración se hace con el motor funcionando con la carga a la que va a ser sometido y se lleva al nivel en el cual el motor además de tener la potencia necesaria para ejecutar su tarea proporcione el mínimo nivel de ruido posible y mayor suavidad en el movimiento.

Facilita considerablemente la programación, puesto que solo requieren ser controlados 3 pines correspondientes al pin DIR con el cual se controla la dirección de movimiento, al pin STEP con el que se ordena dar pasos (avanzar) y el pin ENABLE que permite encender y apagar el motor cuando se desee para evitar que quede energizado cuando se encuentre en reposo.

Figura 38. Esquema de conexión driver A4988.



Fuente: <http://www.robotshop.com/media/files/PDF/datasheet-1182.pdf>.

En el equipo de inyección es ubicado un sensor de contacto fin de curso el cual sirve de referencia para el posicionamiento del carro inyector en función de la cantidad de material que se va a disponer, además también se emplea como el elemento que indica el fin del proceso de electrohilado, y acciona la desenergización de todo el sistema.

Debido a que bajo condiciones de operación en las que la velocidad de inyección es muy baja el driver usado presenta significativas elevaciones de temperatura, se incorpora un disipador de calor de cobre y se determina la necesidad de implementar un sistema de ventilación adecuado que evite cualquier tipo de problema relacionado con calentamiento de componentes electrónicos.

Con este sistema de control de inyección construido, y usando una jeringa de 20 cm<sup>3</sup> el usuario puede definir desde la interfaz el caudal de inyección desde 0 a 20mL/min, y el volumen o cantidad de material hasta 20 mL.

Con el propósito de realizar pruebas iniciales del funcionamiento del sistema de inyección se realiza la respectiva programación usando el software de programación de Arduino, ver Anexo J, estableciendo el buen funcionamiento del sistema de inyección diseñado y construido.

## **5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CENTRIFUGADO**

Para hacer el cambio del potenciómetro análogo por el digital fue necesario medir el nivel de tensión de control con el que funciona el variador de velocidad, que es de 15 V, dado que el potenciómetro digital funciona con tensión máxima de 5 V, fue necesario incorporar un circuito de amplificación de tensión, garantizando los 15V de tensión de control del variador. El potenciómetro digital utilizado es un MCP41010 de 256 taps y el circuito de amplificación se utiliza el circuito integrado LM358 que es un amplificador operacional dual, conectado como amplificador no inversor.

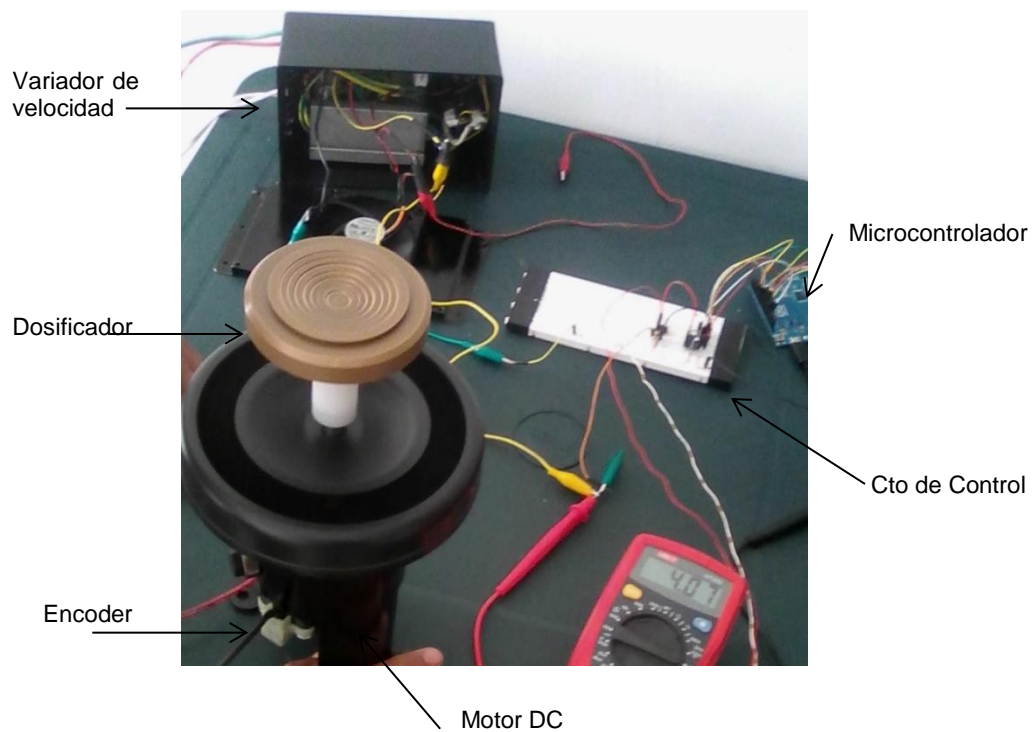
El control proporcional programado, admite una variación de más o menos 32 rpm del valor digitado en velocidad, esto debido a la resolución que ofrece el número de pasos del potenciómetro digital para las revoluciones del motor.

La programación del control automático de velocidad se desarrolla en el software de programación de arduino, ver Anexo K, para lo cual se utiliza la librería SPI para la manipulación del potenciómetro digital.



A excepción de la interfaz de usuario, todos los demás componentes del sistema de centrifugado se indican en la figura 39, el dispositivo empleado para la medición de velocidad (encoder), es mostrado en la figura 40 junto con su soporte diseñado y construido.

Figura 39. Componentes del sistema de centrifugado.



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 40. Dispositivo de medición de velocidad.

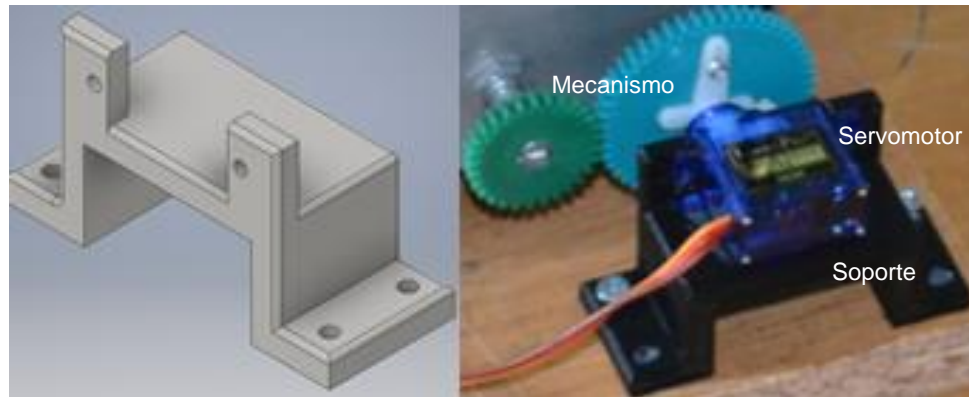


Fuente: Autores del Proyecto.

### 5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO

Para el montaje del mecanismo de control se hace necesaria la construcción de una base para montar el conjunto fuente – servomotor, y adicionalmente el modelamiento, ver Anexo L, y fabricación de un soporte para el servomotor empleando el proceso de impresión 3D; lo anterior se observa en la figura 41.

Figura 41. Soporte para servomotor.



Fuente: Autores del proyecto.

Debido a que el rango de giro del potenciómetro digital es de 0 a 270 grados mientras que el del servomotor es de 0 a 180 grados, es necesario que la relación de transmisión sea como mínimo de 1,5; luego de tener el montaje completo del sistema de campo eléctrico como se muestra en la figura 42 se realiza un trabajo de calibración, el cual consiste en hacer variar la posición del servomotor cada 10 grados desde 150 posición en la cual la fuente proporciona el mínimo valor de tensión, hasta 40 grados en cuya posición la fuente suministra el mayor valor de tensión.

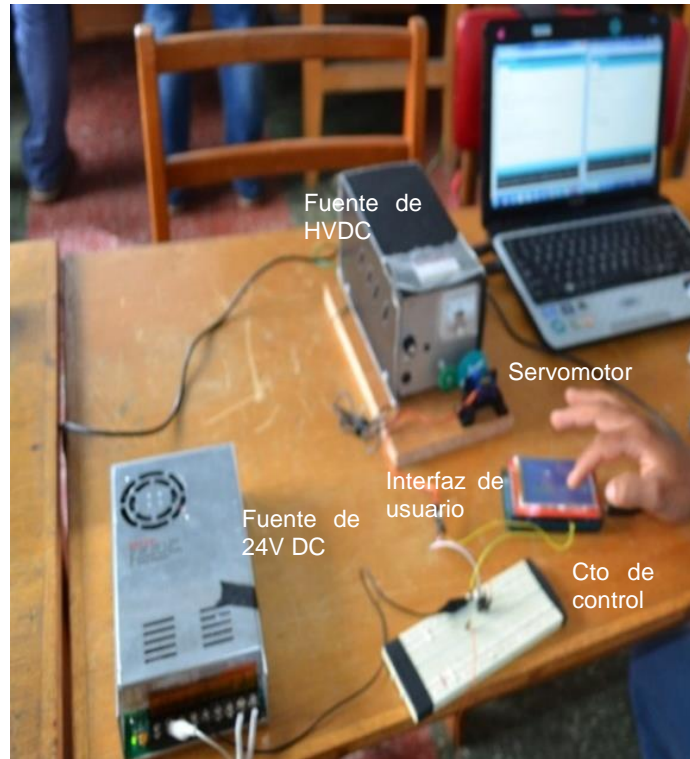
Es de resaltar que para facilitar la programación en Arduino, ver Anexo M, fue empleada la librería “Servo”, la cual es una librería estándar de arduino, es decir viene incluida en el IDE del programador. Una librería es un conjunto de definiciones y funciones escritas en C++ de Arduino, que podemos utilizar en nuestros programas. Podemos ver el código de estos programas, aunque normalmente se requiere un nivel medio alto en C++ para comprender su funcionamiento<sup>16</sup>. Así como la ya mencionada, para el desarrollo de la

<sup>16</sup> PROMETEC. Conociendo los servos. [en línea] Disponible en: <http://www.prometec.net/servos>. Consultado 17 de junio de 2016.



programación de otros sistemas del equipo de electrohilado también se usaron librerías de éste tipo.

Figura 42. Montaje del sistema de campo eléctrico.

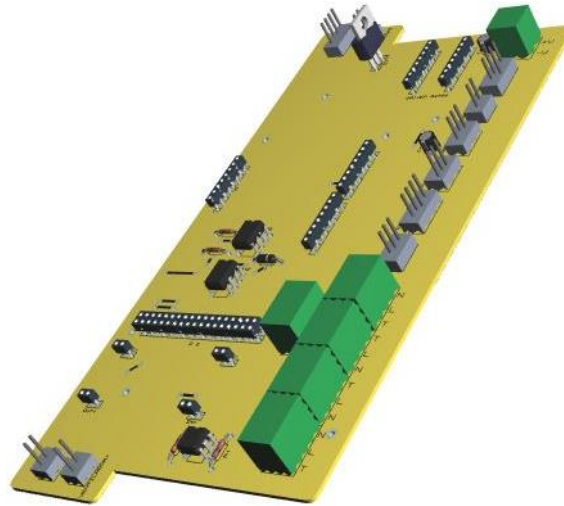


Fuente: Autores del proyecto.

#### 5.4 TARJETAS ELECTRÓNICAS Y DE CONTROL

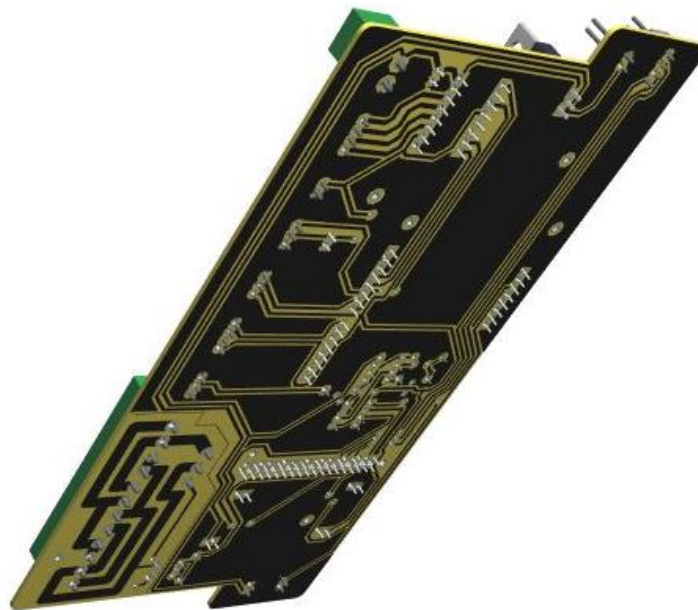
Para el modelamiento e implementación de tarjetas de control, se empleó el software Proteus 8.0 Professional del cual la universidad tiene licencia, y el software libre Fritzing; se hizo el diseño de la tarjeta principal de control, cuyo modelamiento se muestra en las figuras 43 y 44, ver Anexo N, en ésta se implementa un sistema de fácil conexión y desconexión de cableado a través de conectores tipo Molex, contiene todos los circuitos integrados y demás componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del sistema como lo son: Potenciometro digital MCP41010, Amplificador operacional LM358, Driver A4988, reguladores de tensión, diodos, condensadores y resistencias de diferentes valores.

Figura 43. Modelamiento tarjeta principal de control vista superior.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 44. Modelamiento tarjeta principal de control vista inferior.



Fuente: Autores del proyecto.

Ésta tarjeta se alimenta desde una fuente de 24V DC la cual se observa en la figura 45, por medio de una bornera tipo Terminal block, cabe resaltar el uso de un Convertidor DC-DC Regulador Tipo Buck Step Down Módulo LM2596

encargado de la alimentación del sistema incluidas la tarjeta arduino y el módulo de pantalla LCD TFT Touch screen.

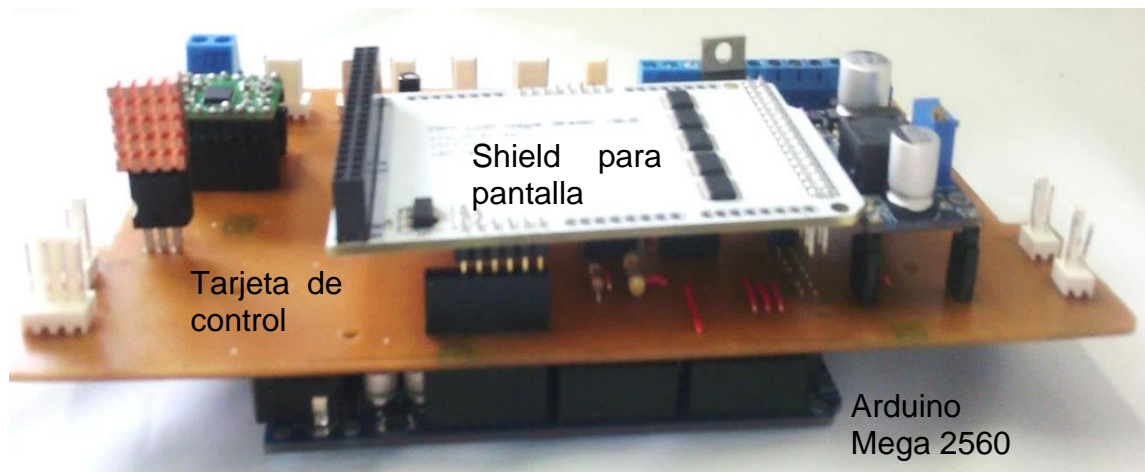
Figura 45. Fuente 24V DC alimentación de circuitos de control.



Fuente: Autores del proyecto.

Con el fin de hacer una conexión sencilla de las entradas y salidas del arduino mega, la tarjeta de control se diseñó y construyó como tipo Shield, para ser montada directamente sobre el microcontrolador, ésta también permite que el escudo adaptador de la pantalla LCD TFT Touch screen se ensamble sobre ella, tal como se muestra en la figura 46.

Figura 46. Tarjeta principal de control Implementada.



Fuente: Autores del proyecto.

Como mecanismo de protección al sistema, la tarjeta principal posee un circuito independiente de optoacople encargado del energizado y desenergizado del sistema, éste se compone principalmente por un MOC 3011, un Triac BTA20 de 20A y de un conjunto de borneras tipo Terminal block de las cuales se conectan el motor DC a través del variador de velocidad, la fuente de Alto Voltaje DC y la fuente de 24V DC.

## **5.5 INTERFAZ DE USUARIO**

Como medio de interfaz entre el equipo y el usuario se decidió emplear un módulo de pantalla LCD táctil, con el objetivo de poder tener total control de todo el equipo a partir de éste, para ello se adquirió un Display LCD TFT gráfico (GLCD) de 3,2" con interfaz táctil (Touch screen) tipo resistiva, éste se muestra en la figura 24, el cual cuenta con una resolución de 320 x 240 pixeles, 65k de colores, con un controlador ILI9341 y comunicación tipo paralela, permitiendo crear formas gráficas, texto y números. Adicionalmente también se adquirió un Shield TFT LCD que es una tarjeta adaptadora para la LCD compatible con Arduino Mega, éste igualmente se observa en la figura 47.

Para realizar la programación de la interfaz, fue necesaria la instalación en el IDE de arduino de un conjunto de librerías desarrolladas por Henning Karlsen como lo son: "UTFT", "UTouch" y "UTFT\_Buttons"; las cuales facilitan la programación de la parte gráfica, la parte táctil y la creación de botones respectivamente. Para el ingreso de imágenes se empleó un software libre y portable llamado "ImageConverter565" en el cual se carga la imagen, se establece su resolución y finalmente genera un código en formato .c el cual fácilmente se puede introducir en arduino para continuar con su programación.

Figura 47. Pantalla LCD Táctil y Shield compatible con Arduino Mega.



Fuente: Autores del proyecto.

Con el fin de tener una plena respuesta de la pantalla fue necesario realizar un proceso de calibración del Touch screen, para ello se empleó el sketch de calibración que la librería UTouch trae como ejemplo, ingresándole el controlador apropiado, éste ejercicio arrojó como resultado los parámetros de calibración mostrados en la tabla 6, cuyos valores son remplazados en el archivo “UTouchCD.h” de la librería ya instalada.

Tabla 6. Parámetros de calibración del Touch screen.

COORDENADA	PARÁMETRO
CAL_X	0x00308EF5UL
CAL_Y	0x03CC4173UL
CAL_S	0x000EF13FUL

Fuente: Autores del proyecto.

Posteriormente se realizó toda la programación correspondiente a la interfaz de usuario, ver Anexo O, como lo son textos, gráficos, colores, botones y la respuesta táctil a través de las coordenadas dependiendo de las posiciones que sean presionadas; en la figura 48 se muestra el menú creado para el control del equipo de electrohilado por centrifugado.

Figura 48. Menú programado en la pantalla.



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura 49 se puede observar la interfaz de variación programada para cada uno de los parámetros del equipo, en la cual es posible aumentar o disminuir sus valores a través de los botones “+” y “-”, se visualizan en la misma, y con el botón “CONFIRMAR” se guardan para ser visualizados cuando se desee. Cabe mencionar que la variación de los parámetros visualizados a través de la interfaz influye directamente en las variables manipuladas, es decir: número de taps en el potenciómetro digital para la velocidad de centrifugado, posición angular del servomotor para el nivel de tensión y tiempo por cada paso en el motor paso a paso para el caudal de inyección.



Figura 49. Interfaz de variación de parámetros.



Fuente: Autores del proyecto.

En los Anexos P, Q y R, se encuentran las especificaciones de la pantalla Touch, del Shield y de la librería UTFT respectivamente.

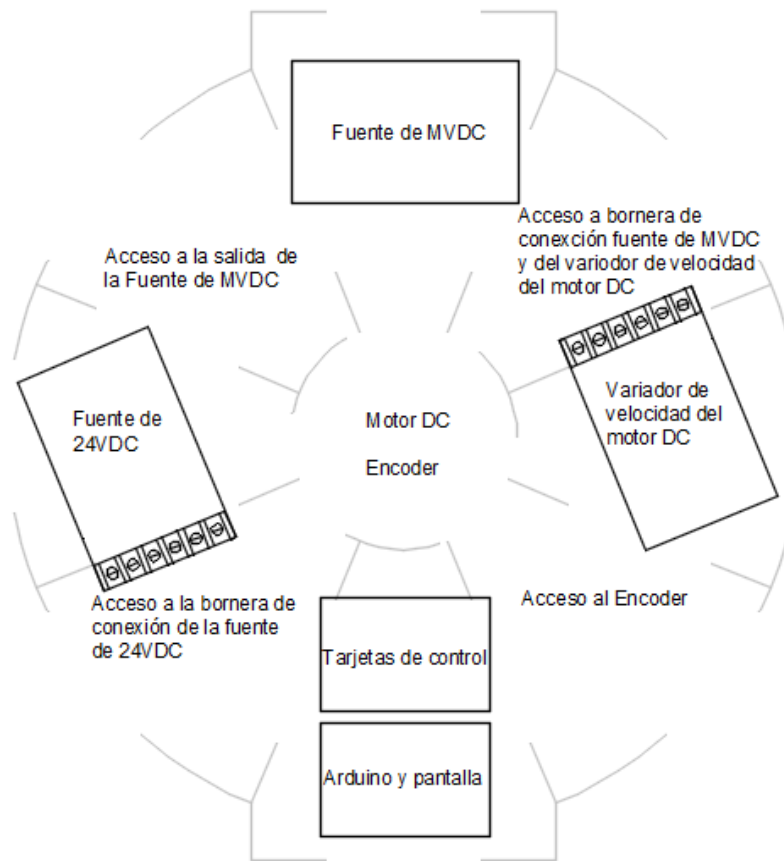
Para apreciar detalladamente el proceso de navegación por la interfaz de usuario y por tanto de la puesta en marcha del proceso de electrohilado es necesario consultar el manual de usuario del equipo.

## 5.6 ENSAMBLE DEL SISTEMA

### 5.6.1 Disposición de componentes

En busca de hacer una adecuada distribución del espacio y de facilitar las conexiones y el acceso a cada uno de los componentes para posteriores procesos de mantenimiento se establece la disposición de componentes mostrada en la figura 50, en ésta se ilustra de forma sencilla y general el ordenamiento de los elementos principales sobre la base principal del equipo y los espacios libres para el acceso a los mismos; cabe adicionar que aproximadamente a 60 cm sobre la fuente de Alto Voltaje DC se ubica el equipo de inyección diseñado y construido.

Figura 50. Disposición de componentes del equipo.



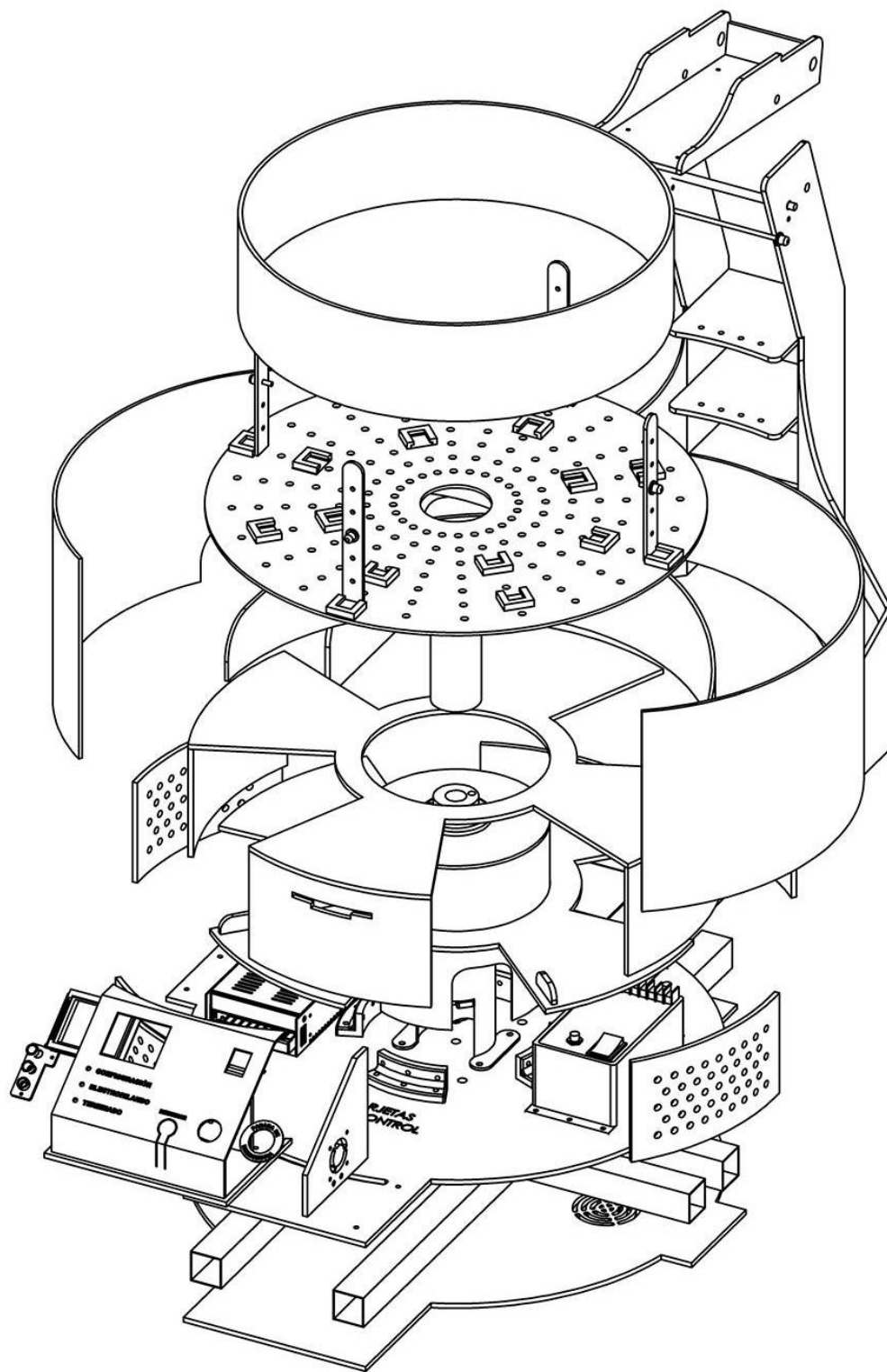
Fuente: Autores del proyecto.

Dos vistas del despiece de todos los componentes del equipo se muestran en las figuras 51 y 52, las cuales facilitan la comprensión de todas las partes que lo componen, así como también del respectivo ensamble de éstas sobre la estructura o carcasa.

En la figura 53 se observa una fotografía del montaje de los elementos del equipo siguiendo la disposición ya establecida, en éste también se encuentran conectados otros elementos importantes del equipo como lo son: interruptor de encendido y apagado, pulsador de parada de emergencia, conector de alimentación del equipo tipo entrada IEC C14, fusible y portafusible.

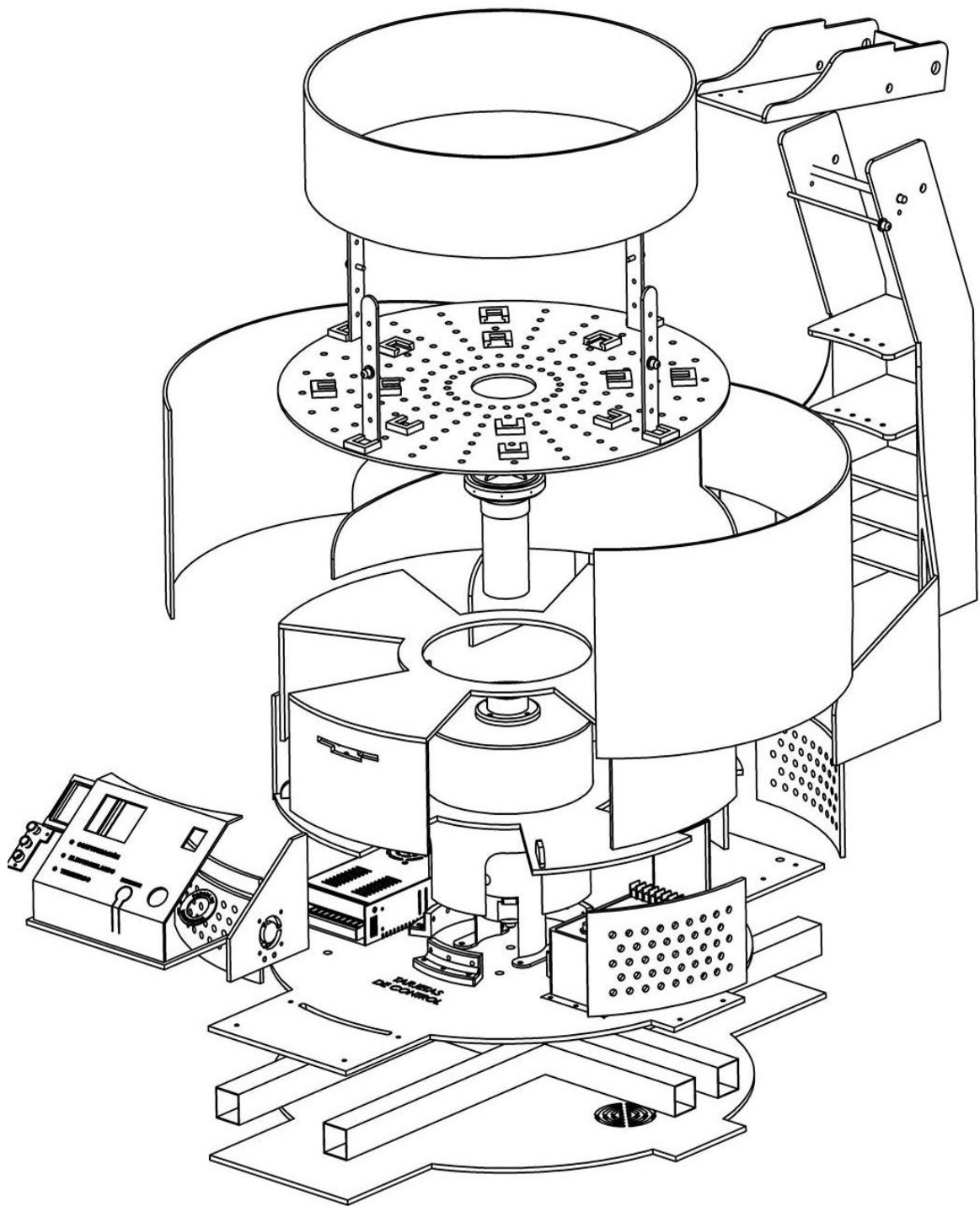


Figura 51. Despiece del equipo de electrohilado por centrifugado (1).



Fuente: Autores del proyecto.

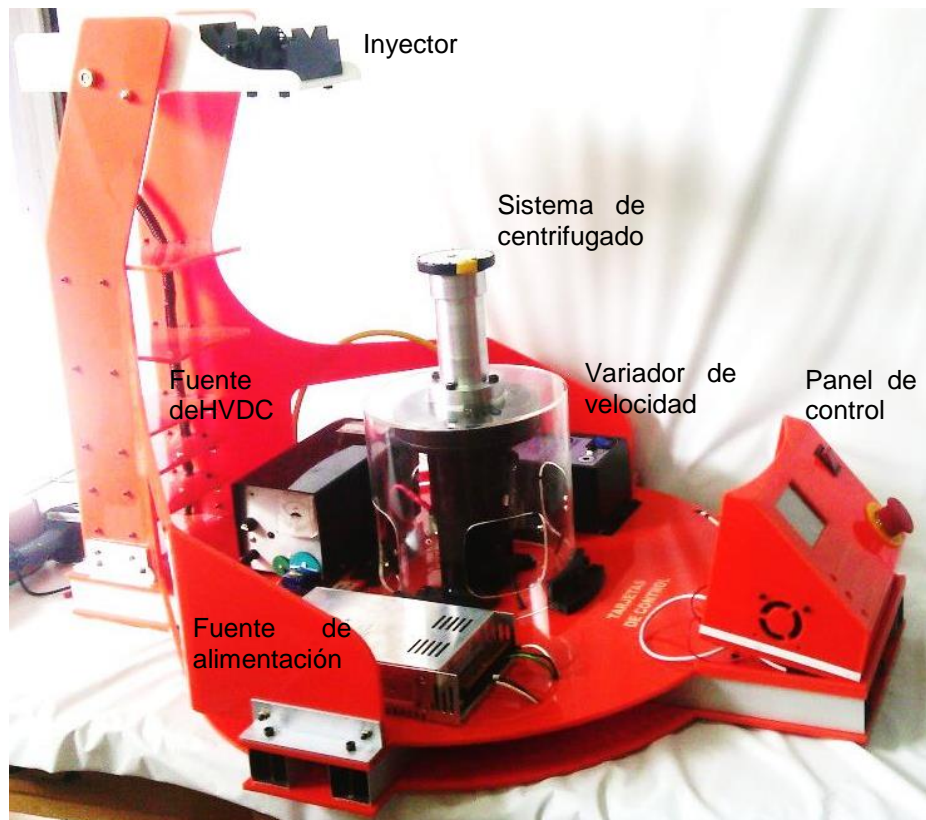
Figura 52. Despiece del equipo de electrohilado por centrifugado (2).



Fuente: Autores del proyecto.

Es importante resaltar que debido a que uno de los requerimientos del equipo es que cumpla con especificaciones técnicas y ergonómicas, argumentadas con análisis y diseños de producto, la estructura o carcasa construida para el equipo, en la cual se montan todos los elementos como se observa en la siguiente figura, fue diseñada y construida por estudiantes de la escuela de diseño industrial de la Uptc, quienes adelantaron tal trabajo como proyecto paralelo al presentado en éste informe.

Figura 53. Fotografía disposición de elementos.



Fuente: Autores del proyecto.

### 5.6.2 Integración con la interfaz de usuario

Una vez conectados todos los elementos del equipo de electrohilado por centrifugado como lo son sistema de inyección, sistema de centrifugado, sistema de campo eléctrico, tarjetas de control y de energizado; se monta el Shield construido para el arduino Mega, y a éste se conecta el módulo de pantalla TFT LCD Touch screen.

Para integrar la interfaz con el equipo, se ha programado de forma que cada uno de los sistemas del equipo respondan a las instrucciones dadas desde la pantalla, cumpliendo los tiempos y secuencias establecidos según los diagramas de proceso y de flujo ya presentados; Se realizan las primeras pruebas de funcionamiento de todo el sistema de control. Como resultado de lo anterior, se concreta el código de programación general en arduino, ver Anexo S, el cual se carga en la tarjeta arduino Mega 2560 de manera definitiva, pues es éste el que da funcionamiento a todo el equipo a través de la interfaz de usuario.

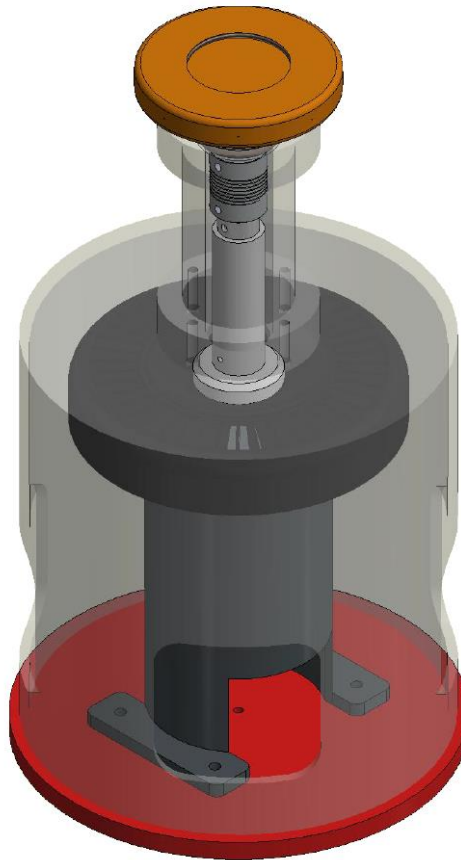
## 6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

### 6.1 PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO

#### 6.1.1 Sistema de centrifugado

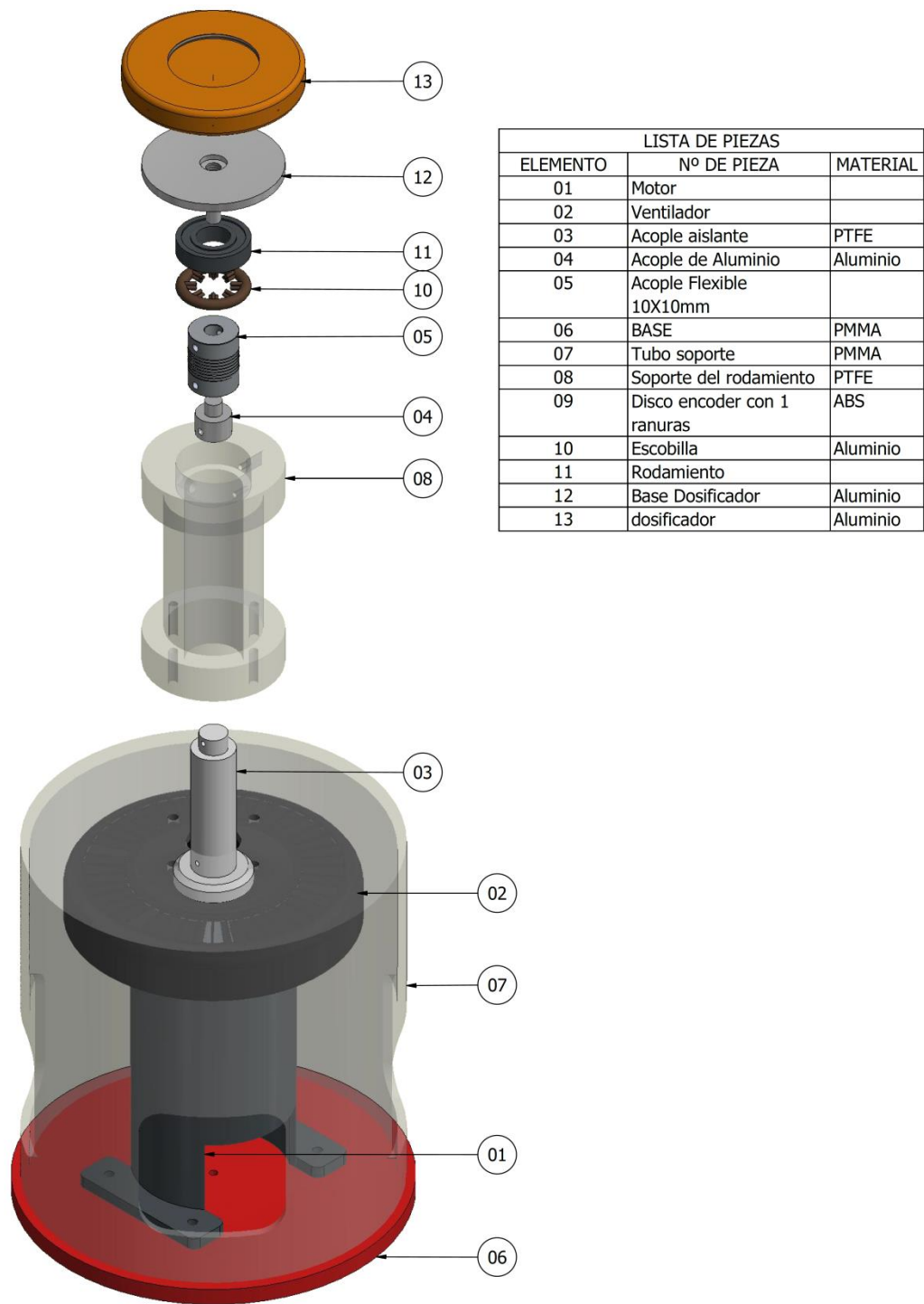
Además del motor DC, el sistema de centrifugado está conformado por una pieza fija que sirve de soporte al dosificador, y de una parte móvil ubicada en su interior, la cual es acoplada al eje por medio de un acople flexible que nos ayuda a disminuir las vibraciones presentes en el sistema; entre las piezas fija y las que se encuentran en rotación, se dispuso de un rodamiento axial de bolas que evita la fricción entre éstas. El modelado y despiece de los elementos que componen el sistema de centrifugado se muestran en las figuras 54 y 55 respectivamente.

Figura 54. Modelado del sistema de centrifugado.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 55. Despiece del sistema de centrifugado.



Fuente: Autores del proyecto.

Para garantizar la conexión permanente de la fuente de Alto Voltaje DC con el dosificador, cuando éste se encuentre en rotación, se construyó la escobilla mostrada en la parte inferior-izquierda de la siguiente figura, la cual es ensamblada en el fondo de la pieza fija, de ésta manera sus filamentos hacen contacto con el eje móvil que es solidario al dosificador. La funcionalidad de éste sistema fue validada por medio de pruebas tomando mediciones de continuidad y voltaje entre los puntos involucrados obteniendo resultados satisfactorios. En la siguiente figura se observan las piezas que componen el sistema de centrifugado, algunas adquiridas y otras maquinadas en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Uptc seccional Duitama.

Figura 56. Elementos del sistema de centrifugado.

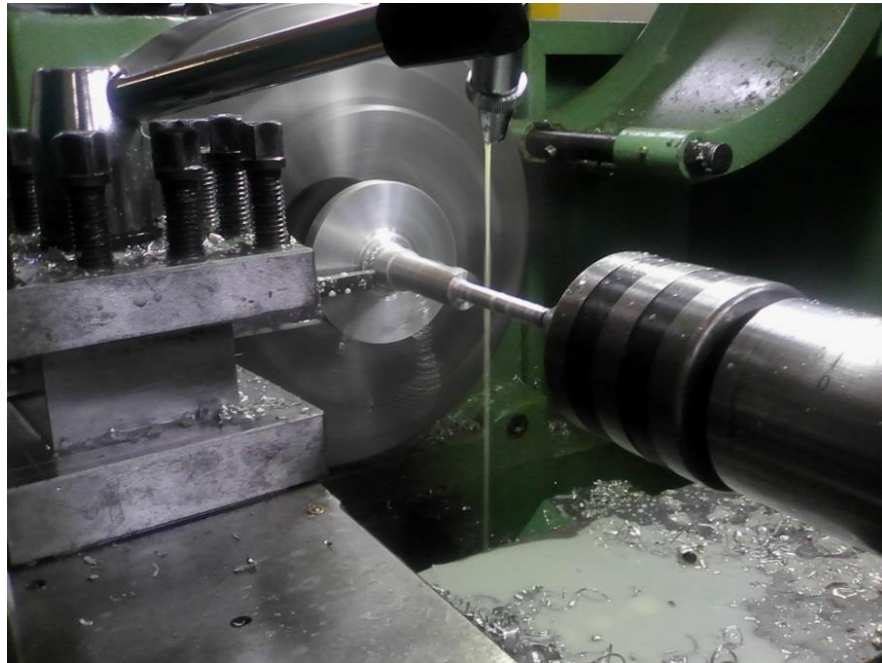


Fuente: Autores del proyecto.



Cabe mencionar que, en el maquinado de las roscas del dosificador, figura 57, y de su tapa fue muy importante tener en cuenta el sentido de giro del motor, con el objetivo de disminuir el riesgo de desprendimiento de éstas piezas a altas velocidades rotacionales, puesto que cumplen con la característica de ser fácilmente extraíbles para su limpieza.

Figura 57. Maquinado del dosificador.



Fuente: Autores del proyecto.

El dosificador construido y montado en el equipo es de cara plana con diámetro exterior de 10 cm, y 8 agujeros de 0,8 mm de diámetro; pero de acuerdo con el sistema diseñado y construido, éste dosificador es fácilmente extraíble, permitiendo ser cambiado por otros, con diferentes formas, tamaños y cantidad de orificios. De ésta manera, se les facilita a los usuarios del equipo la experimentación, promoviendo la investigación adelantada por el grupo DANUM de la Uptc, en lo relacionado con la producción de nanofibras poliméricas.

### **6.1.2 Aislamiento**

Debido a las altas tensiones presentes en el sistema de campo eléctrico, fue necesario tomar medidas de precaución para evitar interferencias con el resto de componentes eléctricos y electrónicos del equipo, para esto se empleó Politetrafluoroetileno (PTFE) comúnmente conocido como Teflón, por contar con



muy buenas características dieléctricas puesto que según pruebas realizadas como la ASTM D 149 éste material cuenta con una rigidez dieléctrica de 55 kV/mm. Se identificaron los diferentes puntos de posible riesgo y se cubrieron con el polímero PTFE en alguna de sus dos presentaciones como lo son barra o cinta, según el componente del sistema a aislar, principalmente el eje del motor correspondiente al sistema de centrifugado, y el empalme existente entre la salida de la fuente y el conductor.

El conductor empleado se muestra en la figura 58, es conocido como cable de bujía, en un automóvil, éste es el encargado de transmitir las altas tensiones generadas en la bobina de encendido del distribuidor y enviarlas a las bujías de encendido soportando tensiones de hasta 40 kV, pues cuenta con propiedades aislantes de clase primera, además de una alta resistencia térmica (Hasta 200 °C), resistencia a las vibraciones y a las variaciones de temperatura y humedad.

Figura 58. Conductor de alta tensión.



Fuente: Autores del proyecto.

Para validar el aislamiento tanto en el conductor como en los demás puntos críticos, se realizaron pruebas, llevando el sistema hasta 32 kV sin presentar ningún tipo de falla o inconveniente.

### 6.1.3 Panel de control

Figura 59. Panel de control.



Fuente: Autores del proyecto.

Tal como se observa en la figura anterior, el panel de control del equipo consta principalmente de la pantalla touch desde la cual se definen los parámetros de control del equipo, adicionalmente cuenta con un interruptor de encendido y apagado, pulsador de parada de emergencia, botón de reinicio del sistema y leds de señalización dependiendo del estado del proceso.

En el interior del panel de control se encuentran la mayoría de los componentes electrónicos y de control, algunos de ellos son susceptibles a calentamiento, lo que puede ocasionar su deterioro, por ésta razón fue necesario implementar un sistema de ventilación como se muestra en la figura 60, empleando 2 ventiladores de 12V alimentados desde la fuente principal del equipo a través de un regulador de voltaje LM7812, donde el situado en la izquierda del módulo actúa como admisor de aire frío, y el de la derecha como extractor de aire caliente, generando en el interior del panel un flujo de aire suficiente para la ventilación de los componentes que lo requieren.

Figura 60. Sistema de ventilación del panel de control.



Fuente: Autores del proyecto.

#### **6.1.4 Estructura del Equipo**

La base o soporte fue construida a partir de perfiles de aluminio de  $\frac{1}{2}$ ", y es ésta la que le brinda rigidez y estabilidad al equipo; para el resto de la estructura o carcasa se emplearon láminas de 6mm de polimetilmetacrilato (PMMA) conocido usualmente como acrílico, dicho material es uno de los polímeros más usados en ingeniería y permite la creación de formas, pues al aplicarle calor es posible hacer dobleces perfectos creando superficies con excelentes acabados. Cabe resaltar que como se mencionó anteriormente, el diseño de la carcasa del equipo fue realizado por estudiantes de la escuela de Diseño Industrial de la Uptc.

Una característica muy importante de la carcasa del equipo es que sus paredes son giratorias permitiendo el acceso a cualquiera de los componentes para su manipulación o futuro mantenimiento. Cabe mencionar que el panel de control es totalmente independiente, lo que permite que sea extraído fácilmente.

#### **6.1.5 Cableado**

Con el objetivo de garantizar estética al equipo, el cableado se dispuso de tal manera que quedara totalmente oculto, para ello se aprovechó que la máquina posee dos bases de PMMA dentro de las cuales se encuentra la estructura de aluminio y se proporciona el espacio suficiente para alojar todo el cableado, de tal

manera que todos los conductores que salen del módulo de control se dirigen ocultamente hacia el componente destino.

## 6.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se realizan las pruebas correspondientes al funcionamiento del sistema de control, inicialmente se hicieron mediciones de velocidad rotacional en el sistema de centrifugado, con ayuda de un tacómetro digital óptico como se muestra en la figura 61, verificando que efectivamente el valor de velocidad rotacional deseado y parametrizado desde la interfaz de usuario, corresponde al valor medido con el tacómetro con un error promedio del 3%.

Figura 61. Pruebas de velocidad rotacional.



Fuente: Autores del proyecto.

Empleando una punta de medición de alta tensión en DC la cual reduce el valor de tensión de 1000 a 1 V, lo que permite realizar la medida con un multímetro común, se toman medidas de la tensión suministrada por la fuente de Alto Voltaje DC, y se comparan con los valores establecidos en el panel de control, verificando que dichos valores son coincidentes con un máximo error del 4%.

Arrancando el inyector a diferentes caudales, cronometrando el tiempo que tarda en el avance, y haciendo pruebas de posicionamiento para diferentes valores de volumen, se valida el correcto funcionamiento del sistema de inyección, adicionalmente se verifica que el sistema aporta el torque necesario para ejecutar la inyección del material polimérico PLA.

Una vez montados y conectados todos los sistemas que componen el equipo, se realizan las pruebas de secuencia de actuación de cada uno de ellos, de acuerdo al diagrama de flujo planteado y la programación ejecutada en el microcontrolador obteniendo resultados completamente satisfactorios.

Con las pruebas anteriormente mencionadas se constató que cada uno de los sistemas y el equipo en general, funcionan correctamente y de acorde con el diseño realizado en el inicio del trabajo.

Con el propósito de seleccionar la protección frente a fallas eléctricas necesaria para el equipo, se ejecutó una medición de consumo de corriente total, la cual nos permitió establecer la necesidad de conectar un fusible de 10A.

Como prueba de funcionamiento final se trabajó el equipo en las condiciones más críticas, es decir, a la máxima velocidad, máximo nivel de tensión, menor velocidad de inyección y durante un prolongado tiempo de operación, sin presentarse ninguna falla.

### **6.3 RESULTADOS**

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento, se tiene como resultado final al equipo de electrohilado por centrifugado totalmente terminado, el cual se muestra en la figura 62, y puesto a punto con su sistema de control automático.

El colector de prueba dispuesto en el equipo fue construido con lámina metálica cuya resistencia es inferior a  $0,4 \Omega$  por lo cual es un excelente conductor eléctrico apropiado para ésta aplicación. Además, es de resaltar que debido a que la distancia entre dosificador y colector es una de las variables con la que el usuario debe experimentar, el equipo permite la fácil extracción e intercambio del colector por otro del tamaño que se desee.

Figura 62. Equipo de electrohilado por centrifugado.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 63. Colocación de PLA a electrohilar.



Fuente: Autores del proyecto.

En la figura anterior se muestra el momento en que se sitúa el material polimérico disuelto, el cual fue inyectado para la producción de las primeras membranas de fibras poliméricas a partir de poliláctico (PLA). El medio por el cual el material polimérico disuelto se desplaza desde el inyector hacia el dosificador es una pequeña manguera con diámetro interior de 3 mm, la cual se observa en el detalle de la figura 64.

Figura 64. Manguera inyector - dosificador.

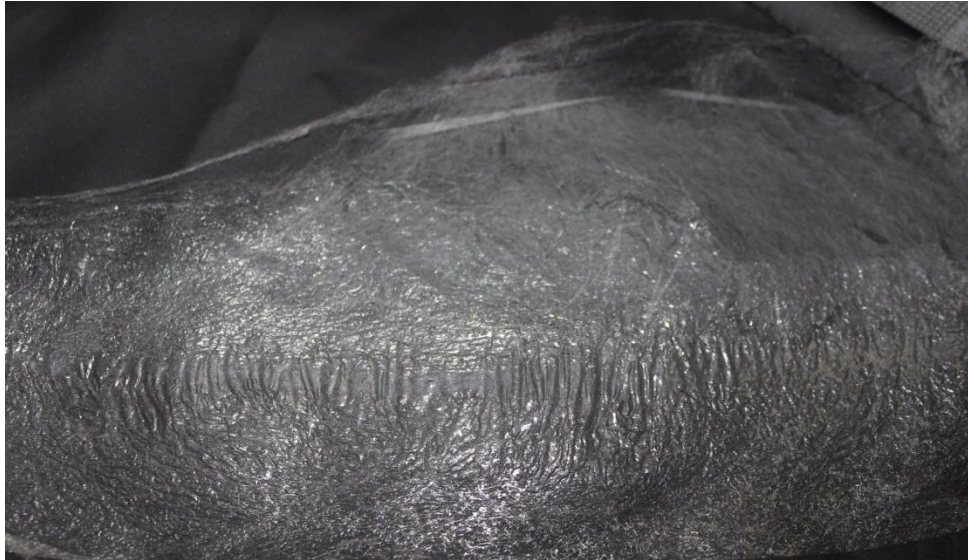


Fuente: Autores del proyecto.

Las primeras fibras se electrohilaron a 10 kV, 3000 rpm y caudal de inyección de 3 ml/min, algunas de éstas se muestran en las figuras 65 y 66, las cuales actualmente se encuentran en análisis de microscopia para determinar sus dimensiones.



Figura 65. Primeras membranas de fibras electrohiladas.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 66. Fibras electrohiladas.



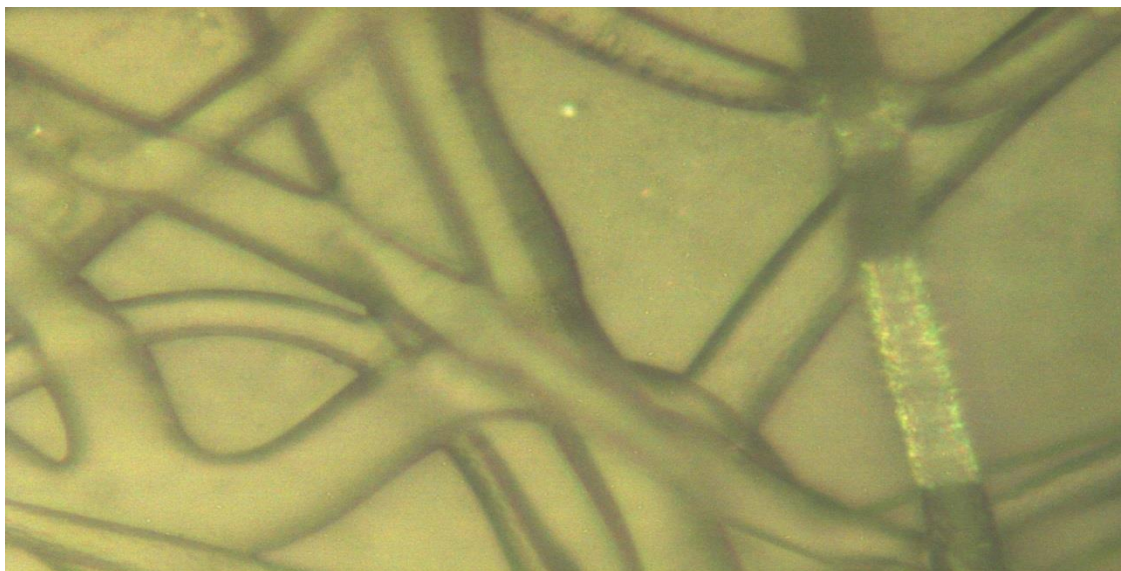
Fuente: Autores del proyecto.

Se tomaron muestras de las membranas de fibras producidas, y fueron analizadas empleando un microscopio electrónico que posee el laboratorio de metales y tratamientos térmicos de la Uptc facultad seccional Duitama, obteniendo las



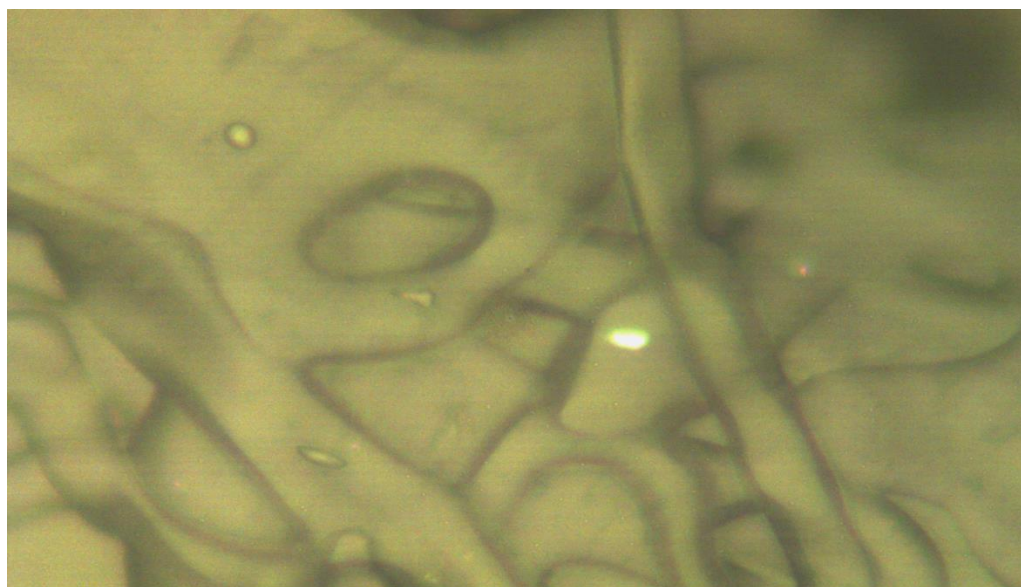
capturas mostradas en las figuras 67 y 68 en las que se evidencia la formación de redes porosas, y según el número de aumentos empleados en el análisis se establece que se encuentran en la escala de micras.

Figura 67. Captura 1 del microscopio electrónico.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 68. Captura 2 del microscopio electrónico.



Fuente: Autores del proyecto.

### **6.3.1 Manual de usuario**

Con el objetivo de que los usuarios del equipo tengan información clara sobre las instrucciones de operación de éste, así como de las precauciones a tener en cuenta, y esquemas que permitan la facilidad de mantenimiento, fue desarrollado un manual de usuario el cual se puede encontrar en el Anexo T de éste trabajo.

Cabe resaltar que éste proyecto, clasificó y fue presentado como ponencia por sus autores, en el XIV Encuentro Regional de Semilleros de Investigación REDCOLSI NODO BOYACÁ, Realizado en la Fundación Universitaria Juan de Castellanos sede Tunja, del 11 al 13 de mayo de 2016, obteniendo gran aceptación de los asistentes y generando grandes expectativas en los mismos.

## CONCLUSIONES

- Se ha diseñado y construido un equipo que permite la manipulación de los parámetros de operación del proceso de hilado, relacionados con la velocidad de giro en el rango de 1000 a 5000 rpm, aplicación de campo eléctrico en el rango de 5 a 20 Kv, para el electrohilado por centrifugado de PLA disuelto, o de materiales con características similares, proporcionándose una herramienta que facilita el trabajo experimental para promover la investigación en lo relacionado con producción de nanofibras poliméricas.
- Las técnicas de control implementadas obedecen a las características de cada uno de los componentes del sistema, es así que para el inyector y para la aplicación de campo se implementan un sistemas de control en lazo abierto, y para la velocidad de centrifugado un control en lazo cerrado de tipo proporcional, todos implementados a partir de modelamientos matemáticos o curvas de calibración.
- Es de resaltar que la precisión en el control de un sistema no solo depende de la técnica empleada sino también de los elementos que lo componen, éste es el caso del control del inyector, en el cual aunque la técnica empleada es de lazo abierto, por utilizar un motor paso a paso y un driver para fracción de paso, el sistema se hace exacto tanto en posicionamiento como en velocidad de inyección.
- Con respecto al inyector diseñado y construido, se resalta que el análisis matemático desarrollado permitió encontrar expresiones que facilitaron la programación del sistema de control, además éste inyector es un elemento que fácilmente puede ser replicado por sus características constructivas y la asequibilidad a los elementos que lo componen, así como su bajo costo, comparado con los encontrados en el mercado.
- Con las pruebas de electrohilado realizadas, se evidencia que la mejor calidad de fibras se obtiene a velocidad rotacional de 3000 rpm y tensión entre 10 y 15 kV, con un caudal de inyección de 5 mL/min. Sin embargo, de acuerdo con los referentes teóricos, otros investigadores han encontrado que tanto el diámetro de los agujeros en el dosificador como la velocidad rotacional adecuada depende de algunas propiedades de la solución empleada, como la viscosidad, la tensión superficial y la densidad. Por tal razón, se recomienda que en trabajos futuros se realice control de otros parámetros del proceso, adicional a los de operación ya controlados en éste trabajo.

- En cuanto al diseño y construcción de tarjetas o circuitos electrónicos, se encuentra que al contar con una configuración tipo Shield, proporciona facilidad en la conexión con otros elementos, especialmente con la tarjeta microcontroladora de arduino, además reduce significativamente el espacio ocupado, en comparación con otros tipos de configuraciones.
- Con las pruebas experimentales realizadas se evidencia la viabilidad técnica del equipo de electro hilado mediante el centrifugado y la presencia de un campo eléctrico, las cuales validan la funcionalidad de los tipos de control empleados para cada sistema.
- El desarrollo de este trabajo mantiene la dinámica de diseño de maquinaria y equipo seguida por el grupo de investigación en energía y Nuevas Tecnologías GENTE, ofreciendo además una base del conocimiento que complementa los trabajos hasta ahora desarrollados.
- La aplicación de técnicas de control, acompañado de los conceptos de la electrónica y la programación, permiten el diseño e implementación de sistemas de control para cualquier tipo de proceso o equipo.

## **RECOMENDACIONES**

En las actividades de investigación realizadas en adelante con el equipo, se aconseja la experimentación con diferentes tamaños tanto de colector, como también de dosificador y de sus agujeros, aprovechando que la configuración del equipo lo permite.

Para el uso del dispositivo se debe seguir las instrucciones entregadas en el manual de operación del equipo, manteniendo especial precaución por el trabajo con tensiones que van hasta los 25 kV.

Se deba conectar siempre el equipo a un tomacorriente con sistema de puesta a tierra, y cerciorarse del nivel de tensión de alimentación adecuado para el funcionamiento del equipo, es decir 110 V.

La jeringa empleada es desechable por lo cual debe ser remplazada regularmente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMALORPAVA, Mary, Senthilram T, Suganya S, Nagarajan J. Venugopal, Ramakrishna S, V. R. Giri Dev (2012). Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery Vehicle. eXPRESS Polymer Letters Vol.7, No.3 238–248.
- [2] GÓMEZ PACHÓN, Edwin Yesid, Montiel Campos Raúl, Moreno Rondón Eyleen Vanessa, Vera-Graziano Ricardo (2010). Diseño de un equipo de electrospinning para la fabricación de andamios de nanofibras para aplicaciones biomédicas.
- [3] JAYARAMAN K, Kotaki M, Zhang Y, Mo X, Ramakrishna S (2004). Recent advances in polymer nanofibers. J Nanosci Nanotechnol 4: 52–65.
- [4] PRADO AMARO, Franky Asael (2014). Diseño de un minisistema electrospinning. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, ipn. Universidad Tecnológica de Querétaro.
- [5] Md. MAHABUB Hasan, A.K.M. Mashud Alam, Khandakar Abu Nayem. Application of Electrospinning techniques for the production of tissue engineering scaffolds, review (2014). European Scientific Journal. ISSN: 1857 – 7881.
- [6] CICERO Jhon A. and Dorgan Jhon R. (2002) Physical properties and Fiber morphology of poly(lactic acid) obtained from Continuous Two-Step Melt Spinning. Journal of Polymers and the Environment.
- [7] CHANG, Kee Lee, Seon Jeong Kim, Sun I Kim, Byung-Ju Yi and Seog Young Han (2006). Preparation of chitosan microfibrils using electro-wet-spinning and their electroactuation properties. Institute of physics. DOI:10.1088/0964-1726/15/2/044.
- [10] TESIS.USON. [En línea] Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/22289/Capitulo4.pdf>. Consultado 29 de octubre de 2015.
- [11] UPCOMMONS.upc. [En línea] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>. Consultado 19 de noviembre de 2015.

[12] KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de control moderna. PEARSON EDUCACIÓN, S.A, Madrid, 2010. ISBN: 979-84-8322-660-5. p. 7.

[13] INVESTIGACIÓN CONTROLADORES. Club Ensayos. [En línea] Disponible en: <https://www.clubensayos.com/Tecnolog%C3%ADA/Investigacion-Controladores/1703442>. Consultado 15 de junio de 2016.

[14] MOHAMMAD REZA BADROSSAMAY, Holly Alice McIlwee, Josue A. Goss, and Kevin Kit Parker. Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning. Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138.

[15] AUTODESK INVENTOR / Modelamiento 3D CAD, [En línea] Disponible en: <http://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>

[16] FRANCISCO A. Candelas Herías, Juan A. Corrales Ramón (2007). Servomotores. Universidad de Alicante.

[17] PROMETEC. Conociendo los servos. [En línea] Disponible en: <http://www.prometec.net/servos>. Consultado 17 de junio de 2016.

## ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo A:</b> Diagrama de flujo completo .....	37
<b>Anexo B:</b> Modelo CAD del inyector con Autodesk Inventor, en CD.....	39
<b>Anexo C:</b> Cálculos del sistema de inyección, en CD.....	45
<b>Anexo D:</b> Modelo CAD de piezas fabricadas para el sistema de centrifugado, en CD.....	46
<b>Anexo E:</b> Plano del dosificador.....	47
<b>Anexo F:</b> Calibración del sistema de campo eléctrico, en CD.....	54
<b>Anexo G:</b> Esquema del circuito de control total del equipo.....	54
<b>Anexo H:</b> Plano de piezas del inyector construido.....	55
<b>Anexo I:</b> Ficha técnica del inyector construido.....	56
<b>Anexo J:</b> Código de Programación en arduino sistema de inyección, en CD.....	58
<b>Anexo K:</b> Código de Programación en arduino Control proporcional sistema de centrifugado, en CD.....	58
<b>Anexo L:</b> Modelo CAD del soporte para el servomotor, en CD.....	60
<b>Anexo M:</b> Código de Programación sistema de Campo eléctrico, en CD.....	60
<b>Anexo N:</b> Modelamiento tarjeta de control principal, en CD.....	61
<b>Anexo O:</b> Código de Programación en arduino Interfaz de usuario, en CD.....	65
<b>Anexo P:</b> Especificaciones del Display LCD TFT 320QVT 9341, en CD.....	66
<b>Anexo Q:</b> Hoja de datos TFT LCD Shield V2.2, en CD.....	66
<b>Anexo R:</b> Requerimientos e instructivo de uso de librería UTFT, en CD.....	66
<b>Anexo S:</b> Código de Programación en arduino de todo el sistema de control automático del equipo, en CD.....	68
<b>Anexo T:</b> Manual de usuario del equipo de electrohilado por centrifugado.....	78